



TUGAS AKHIR (MO 1336)

**ANALISA MEKANISME *UPHEAVAL BUCKLING* PADA PIPA  
*OFFSHORE PIPELINE* STUDI KASUS: PT. UNIVERSAL  
BATAM ENERGY (PT. UBE) DENGAN VARIABEL TANAH,  
TEMPERATUR, DAN TEKANAN**

NOVRIZAL PUTRA AULIA  
NRP. 4310 100 046

Dosen Pembimbing

Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Ir. Handayanu , M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014



**FINAL PROJECT (MO 1336)**

**UPHEAVAL BUCKLING MECHANISM ANALYSIS ON  
OFFSHORE PIPELINE CASE STUDY: PT. UNIVERSAL  
BATAM ENERGY (PT. UBE) WITH VARIABLE SOIL,  
TEMPERATURE, AND PRESSURE**

**NOVRIZAL PUTRA AULIA  
NRP. 4310 100 046**

**Supervisors**

**Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Ir. Handayanu , M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014**

**ANALISA MEKANISME *UPHEAVAL BUCKLING* PADA  
*OFFSHORE PIPELINE* STUDI KASUS: PT. UNIVERSAL  
BATAM ENERGY (PT. UBE) DENGAN VARIABEL TANAH,  
TEMPERATUR, DAN TEKANAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**NOVRIZAL PUTRA AULIA**

NRP. 4310 100 046

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc..... (Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing 2)



SURABAYA, 11 AGUSTUS 2014

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Syukur Alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Ucapan terima kasih sudah sepatutnya diberikan kepada Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing yang selalu menuntun dan mengarahkan penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Tugas Akhir yang berjudul **“Analisa Mekanisme Upheaval Buckling pada Offshore Pipeline Studi Kasus: PT. Universal Batam Energy (PT. UBE) dengan Variabel Tanah, Temperatur, dan Tekanan”** ini menjelaskan mengenai mekanisme penyebab terjadinya upheaval buckling dengan variabel tanah, tekanan dan temperatur milik PT. Univeersal Batam Energy.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat diharapkan sebagai bahan penyempurnaan laporan selanjutnya. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, 4 Agustus 2014

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	vii
KATA PENGANTAR .....	xi
UCAPAN TERIMA KASIH .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xxiii

## BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3 TUJUAN .....	2
1.4 MANFAAT .....	3
1.5 BATASAN MASALAH .....	3

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.2 DASAR TEORI .....	6
2.2.1 ANALISA KETEBALAN PIPA .....	8
2.2.2 TEORI TEGANGAN PIPA .....	9
2.2.2.1 BEBAN PADA SISTEM PERPIPAAN .....	9
2.2.2.2 TEORI TEGANGAN PADA SISTEM PIPA .....	10
2.2.3 TEGANGAN HOOP .....	10

2.2.4 GAYA AKSIAL KOMPRESIF .....	11
2.2.5 TANAH.....	13
2.2.5.1 SIFAT-SIFAT TEKNIS TANAH.....	14
2.2.5.2 TANAH KOHESI.....	14
2.2.5.3 GAYA TEKAN TANAH .....	15
2.2.6 DAWNWARD RESISTANCE .....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 METODE PENELITIAN.....	27
3.2 PROSEDUR Pengerjaan .....	29
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 DATA PIPA .....	33
4.2 PROFIL BATIMETRI .....	35
4.3 ANALISA PERHITUNGAN KEKUATAN TANAH.....	36
4.3.1 TAHANAN TANAH MELINTANG HORIZONTAL.....	37
4.3.2 TAHANAN TANAH LONGITUDINAL .....	39
4.3.3 TRANSVERSE VERTIKAL DOWN .....	41
4.3.4 TRANSVERSE VERTIKAL UP .....	42
4.4 TEBAL PIPA, TEKANAN, DAN TEMPERATUR.....	42
4.5 GAYA AKSIAL EFEKTIF .....	43
4.6 PEMBEBANAN .....	44
4.7 PEMODELAN .....	46
4.7.1 PESISIR BATAM .....	46
4.7.2 TANJUNG UNCANG .....	48

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN.....	52
5.2 SARAN.....	53
DAFTAR PUSTAKA .....	55



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> <i>Upheaval buckling</i> pada pipa onshore di Riau (Prayoga, 2012) .....	5
<b>Gambar 2.2.</b> Local buckling pada pipa (Karamanos, 2009) .....	6
<b>Gambar 2.3.</b> Upheaval buckling pada pipa (Rieska, 2013) .....	7
<b>Gambar 2.4.</b> <i>Hoop stress</i> pada pipa (Norris, 2009) .....	10
<b>Gambar 2.5.</b> Silty sand .....	14
<b>Gambar 2.6.</b> Gaya tekan tanah terhadap <i>imperfection height</i> (Pertamina, 2012) .....	18
<b>Gambar 2.7.</b> Grafik <i>adhesion factor</i> (Manual AutoPIPE) .....	23
 <b>Gambar 3.1.</b> Diagram alir pengerjaan tugas .....	27
<b>Gambar 3.2.</b> Prosedur pengerjaan tugas akhir .....	29
 <b>Gambar 4.1.</b> Grafik profil batimetri .....	35
<b>Gambar 4.2.</b> Pipe schedule API spesifcation 5L .....	43
<b>Gambar 4.3.</b> Pemodelan pipeline pesisir Batam .....	46
<b>Gambar 4.4.</b> Deformasi pada segmen A89 .....	47
<b>Gambar 4.5.</b> Stress pada segmen A89 .....	47
<b>Gambar 4.6.</b> Pemodelan <i>pipeline</i> di pesisir Tanjung Uncang .....	48
<b>Gambar 4.7.</b> Deformasi pada segmen A49 .....	49
<b>Gambar 4.8.</b> Deformasi pada segmen A81 sebesar Dy -64,447 mm .....	49
<b>Gambar 4.9.</b> Deformasi pada segmen A131 sebesar Dy -82,845 mm .....	50
<b>Gambar 4.10.</b> stress pada segmen A49 .....	50
<b>Gambar 4.11.</b> Stress pada segmen A81 .....	51

<b>Gambar 4.12.</b> Stress pada segmen A131 .....	51
---	----

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Daya dukung tanah Mayerhof, (Lim, 2013).....	20
<b>Tabel 2.2.</b> Nilai $R_c$ , (Manual AutoPIPE).....	21
<b>Tabel 2.3.</b> Nilai $R_s$ , (Manual AutoPIPE) .....	22
<b>Tabel 2.4.</b> Persamaan <i>soil resistance</i> horizontal dan longitudinal (Manual AutoPIPE) .....	24
<b>Tabel 2.5.</b> Persamaan <i>soil resistance</i> vertikal up dan vertikal down (Manual AutoPIPE) .....	24
<b>Tabel 4.1.</b> Spesifikasi pipa, (ZEE Engineering, 2013).....	33
<b>Tabel 4.2.</b> Tekanan dan temperatur, (ZEE Engineering, 2013).....	34
<b>Tabel 4.3.</b> Spesifikasi geoteknik, (ZEE Engineering, 2013).....	34
<b>Tabel 4.4.</b> Jenis tanah setiap kilometer poin, (ZEE Engineering, 2013).....	34
<b>Tabel 4.5.</b> Kedalaman profil batimetri dan slope .....	36
<b>Tabel 4.6.</b> Nilai koefisien transverse horizontal, (Manual AutoPIPE).....	37
<b>Tabel 4.7.</b> Nilai koefisien $R_s$ , (Manual AutoPIPE).....	38
<b>Tabel 4.8.</b> Tahanan tanah transverse horizontal .....	39
<b>Tabel 4.9.</b> Sudut friksi internal dan tahanan gesek pipa dengan tanah, (Manual AutoPIPE).....	40
<b>Tabel 4.10.</b> Tahanan tanah dan properti tanah berpasir dan tanah liat, (Manual AutoPIPE).....	40
<b>Tabel 4.11.</b> Faktor daya dukung tanah menurut Mayerhof, (Lim, 2013).....	41
<b>Tabel 4.12.</b> Transverse vertikal down .....	41
<b>Tabel 4.13.</b> Uplift resistance.....	42
<b>Tabel 4.14.</b> Gaya poisson, gaya ekspansi, dan gaya aksial efektif.....	44

<b>Tabel 4.15.</b> Dawnward resistance .....	45
--	----

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

*Offshore pipelines* merupakan salah satu metode dalam memindahkan minyak bumi dan gas dari fasilitas *offshore* ke *plant*, dan dari *onshore* ke *onshore* lainnya. Proses pemasangan pipa yang ditempatkan di *offshore* dan *onshore* harus mengikuti prosedur-prosedur yang telah dibuat. Untuk segala jenis pipa baja yang mengalirkan *fluida service* berupa minyak dan gas harus dibenamkan kedalam tanah sedalam 3 meter. Dengan membenamkan pipa kedalam tanah akan melindungi pipa tersebut dari pengaruh eksternal seperti tubrukan, angin, dan segala hal yang dapat mempengaruhi struktur dari pipa baja tersebut. Namun dengan membenamkan pipa (*buried pipe*) akan muncul masalah baru seperti tekanan pada pipa tersebut akan bertambah. Membenamkan pipa kedalam tanah akan menambah tegangan pada pipa akibat gaya aksial efektif yang akan menyebabkan terjadinya *upheaval buckling* (Surya, 2012). Pada proses desain, sangat penting mempertimbangkan kegagalan berupa *upheaval buckling*. Menurut Palmer dan Baldry (1974), dengan perbedaan temperatur saat instalasi dengan saat operasi, dan perbedaan tekanan internal dan tekanan eksternal pada pipa akan mengakibatkan gaya aksial yang besar dan mengakibatkan pipa melengkung keatas. Untuk menahan deformasi tersebut, jenis tanah mempunyai peran yang penting menahan lengkungan tersebut. Gaya friksi yang terjadi pada permukaan pipa dengan tanah akan menahan lengkungan pada pipa tersebut agar tidak terjadi lengkungan keatas (*upheaval*). Jenis tanah dan kedalaman penimbunan sangat berpengaruh terhadap gaya tekan tanah terhadap pipa agar tidak terjadi deformasi akibat ekspansi thermal.

Hal diatas menunjukkan selain melakukan analisa tekanan pada pipa juga harus mempertimbangkan analisa geoteknik terkait jenis tanah yang akan digunakan untuk menanam pipa. Mengingat bahwa Konsorsium PT. PLN Batam dan PT UBE (Univesal Batam Energy) akan membuat saluran transportasi gas dari pulau

Tanjung Pemping menuju *gas power plant* di Tanjung Uncang-Batam. Pipa yang menghubungkan Tanjung pemping dan Tanjung Uncang mempunyai panjang  $\pm$  12,5 km. Pipa tersebut akan mengalirkan gas pada tahun pertamanya sebanyak 40 MMSCFD dan akan terus meningkat sampai 6 tahun mendatang sebesar 55 MMSCFD.

Pipa gas tersebut akan melewati selat yang menghubungkan pulau Tanjung Pemping ke Tanjung Uncang-Batam dengan pipa yang ditanam (*buried pipe*). Maka tekanan eksternal sangat berpengaruh terhadap analisa tegangan yang terjadi pada pipa. Oleh karena itu desain *offshore pipeline* harus mendukung agar *upheaval buckling* tidak terjadi atau setidaknya masih dalam batas-batas yang diijinkan. Hal itulah yang melatar belakangi penulis mengangkat judul ini yang sekiranya layak untuk dibahas.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Adapun masalah yang akan dibahas pada penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimakah pengaruh variabel tekanan, temperatur, dan kedalaman timbunan pipa terhadap mekanisme *upheaval buckling*?
2. Bagaimanakah pengaruh variabel jenis tanah terhadap gaya tekan pada pipa untuk menahan terjadinya *upheaval buckling*?
3. Apa langkah selanjutnya bila pipa tersebut mengalami *upheaval buckling*?

## **1.3. Tujuan**

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui pengaruh parameter tekanan, temperatur dan kedalaman pipa terhadap mekanisme *upheaval buckling*.
2. Dapat mengetahui pengaruh perbedaan jenis tanah terhadap gaya tekan pada pipa.
3. Dapat mengetahui cara penanggulangan apa bila terjadi *upheaval buckling* pada pipa.

#### 1.4. Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini adalah dapat menjadi salah satu referensi bagi mahasiswa lainnya bila tertarik pada desain sistem *offshore pipeline*. Dari hasil analisa akan dapat diketahui tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa yang dapat mengakibatkan *upheaval buckling* serta dapat mengetahui perbedaan jenis tanah terhadap gaya tekan pada pipa. Sehingga tulisan ini diharapkan dapat bermanfaat terhadap pemilihan jenis tanah dan kedalaman penimbunan agar tidak terjadi *upheaval buckling*.

#### 1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Konfigurasi jenis tanah yang dibandingkan adalah *stiff silty clay* dan *loose silty sand*.
2. Batas dari *imperfection height* sebesar 7,5 m.
3. Fluida yang dialirkan berupa gas.
4. Menggunakan *code* ASME B 31.4, ASME B 31.8, dan DnV OS-F101
5. Tidak meninjau *buckling* pada arah horizontal.
6. Pipa diasumsikan sudah stabil pada saat instalasi.
7. Tidak memperhitungkan beban occasional.
8. Pipa hanya meletak, tidak ada pondasi disetiap segmen.
9. Hanya memperhitungkan pipa tertimbun.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Dalam tugas akhir Prayoga (2012) telah menganalisa pipa upheaval buckling milik PT. Joint Operating Boody Pertamina-Petrochina East java (JOB P-PEJ) yang melintasi sungai Bengawa Solo. Analisa yang dilakukan mengungkapkan bahwa tegangan yang terjadi masih dalam batas dari tegangan ijin. Namun, analisa dilakukan hanya dengan mengasumsikan jenis tanah untuk menimbun pipa berjenis *clay*, dan tidak memperhitungkan faktor korosi pada analisa *upheaval buckling*. Selain itu, tugas akhir Rahman (2008) telah mengungkapkan telah terjadi buckling pada sistem pipa *onshore* di *onshore pipeline* milik JOB PPEJ. Berdasarkan desain yang dilakukan pihak perusahaan terkait pipa tidak akan mengalami deformasi plastis, namun pada kenyataannya telah terjadi *upheaval buckling*. Ternyata setelah diselidiki, kedalaman tanah dan perubahan temperatur saat instalasi dan saat operasi merupakan faktor yang paling signifikan menyebabkan *upheaval buckling*. Hal itu didukung oleh pernyataan James Wang (2009) dalam *proceeding*, menyatakan bahwa kasus *upheaval buckling* pada pipa tidak mengalami deformasi plastis biasa, namun karena gaya aksial akibat ekspansi termal dan ditambah dengan resisten tanah.



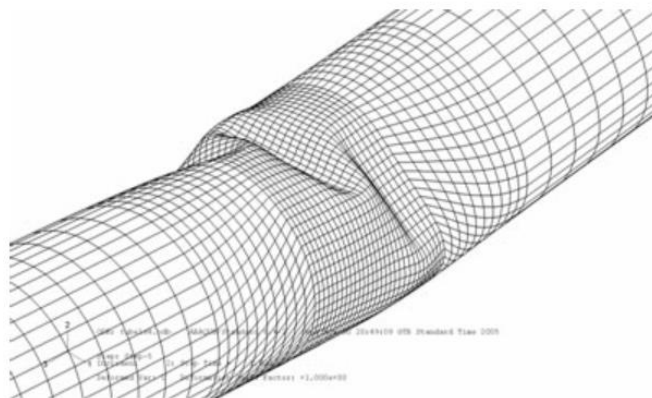
**Gambar 2.1.** *Upheaval buckling* pada pipa onshore di Riau (Prayoga, 2012)

## 2.2. Dasar Teori

Dalam mendesain sistem *offshore pipeline*, perlu mengkaji semua aspek seperti engineering, ekonomi, dan kriteria desain terkait tebal pipa, diameter pipa, kondisi lingkungan, dan termasuk perangkat tambahan untuk mengurangi sistem pipeline mengalami kegagalan. Dari segi teknik, pipa harus dianalisa terkait fenomena buckling. Buckling dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

### 1. *Local Buckling*

Penyebab dari local buckling adalah deformmasi plastis yang terjadi akibat tekanan eksternal maupun karena kombinasi tekanan eksternal dan bending. Kegagalan pada pipa biasanya berbentuk penyok dann dapat menjalar disepanjang pipa disebut propagating pipa. Untuk menghindari propagating pipa dapat dilakukan dengan memasang *buckle arrestor* sehingga perambatan *buckle* dapat berhenti di *buckle arrestor*. Sedangkan defleksi berlebih yag terjadi pada keseluruhan *pipeline* disebut *global buckling*. Ada beberapa jenis *global buckling* seperti *upheaval buckling*, *lateral buckling*, dan *downward pada freespan*.



**Gambar 2.2.** *Local buckling* pada pipa (Karamanos, 2009)

### 2. *Upheaval buckling*

Sistem *offshore pipeline* harus kuat untuk menahan beban operasi selama instalasi pipeline dan saat kondisi operasinya. Saat kondisi operasi *pipeline* akan mengalami pembebanan internal dan eksternal yang diakibatkan perubahan tekanan dan temperatur saat instalasi dan operasi.



**Gambar 2.3** *Upheaval buckling* pada pipa (Rieska, 2013)

Tujuan penimbunan pipa adalah untuk menghindari *pipeline* dari aktivitas bawah laut yang dapat menyebabkan kegagalan seperti jangkar, dan kejatuhan benda. Pada saat operasi, temperatur pada pipa akan lebih tinggi dari pada saat instalasi. Kenaikan temperatur yang cukup signifikan inilah yang menyebabkan pipa mengalami pemanjangan (elongasi). Dikarenakan pipa dikubur didalam tanah, maka fenomena elongasi yang dapat menyebabkan pipa mencuat keluar tanah (*upheaval buckling*) dapat ditahan dengan gaya tekan tanah dan berat timbunan tanah tersebut. Gaya tekan tanah terhadap pipa sangat bergantung pada gaya friksi tanah dan jenis tanah yang digunakan untuk menimbun pipa tersebut.

Kombinasi dari tekanan internal dan tekanan eksternal akan menyebabkan gaya aksial tekan efektif pada pipa. Adanya lekukan awal akibat proses instalasi dan tidak rata permukaan tanah menyebabkan gaya aksial tekan efektif pipa berubah menjadi gaya vertikal pipa terhadap lapisan tanah di atasnya. Gaya vertikal ini akan ditahan dengan berat tanah di atasnya, bila gaya tekan tanah tidak bisa menahan gaya vertikal tersebut maka akan timbul *displacement* yang besar atau munculnya bagian pipa yang melengkung keluar dari dalam tanah. Secara teoritis, probabilitas dari propagation buckling akan dimulai tidak lebih tinggi (bahkan lebih rendah) dari probabilitas *local buckling* (Rizaldi, 2008). Namun

karena adanya risiko ekonomi yang besar maka perlu adanya penyelidikan yang lebih jauh mengenai *upheaval buckling*.

Berikut adalah proses terjadinya *upheaval buckling* (Fan, 2013):

1. Terjadi lekukan awal akibat kesalahan instalasi dan pemilihan rute yang tidak lurus dan rata.
2. Ketika pipa sudah ditimbun dan mulai beroperasi, terjadi perbedaan tekanan dan temperatur saat instalasi dan operasi yang menyebabkan gaya aksial tekan efektif pada pipa.
3. Kombinasi gaya aksial, ketidakrataan tanah, dan ketidaklurusan pipa akan mengubah gaya aksial menjadi gaya vertikal pada lapisan tanah di atasnya.
4. Gaya vertikal pipa akan ditahan dengan gaya tekan tanah sehingga lekukan keatas dapat ditahan, bila gaya tekan tanah tidak dapat menahan gaya vertikal maka akan terjadi lekukan pipa yang besar sampai menembus tanah.

### **2.2.1. Analisa Ketebalan Pipa**

Analisa ketebalan pipa akan mengacu pada ASME B31.3 2002 dimana ketebalan pipa dirancang untuk memperoleh peningkatan safety factor terhadap perubahan beban internal. Penentuan ketebalan pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$t = \frac{P \times D_e}{2 (SE + PY)} \quad (2.1)$$

Dengan:

- t = Tebal minimum pipa (mm)  
P = Tekanan desain (Mpa)  
D<sub>e</sub> = Diameter eksternal Pipa (mm)  
S = Tegangan ijin (Mpa)  
E = Faktor join longitudinal (E=1)

$Y$  = koefisien material.

Untuk  $t > D/6$  koefisien material dapat dihitung dengan persamaan

$$Y = \frac{d+2c}{D_e+D_i+2c} \quad (2.2)$$

Dengan:

$c$  = jumlah toleransi mekanikal (diasumsikan 0,5 mm menurut ASME B31.3 2002)

$D_i$  = Internal diameter

Tebal minimum merupakan kombinasi dari tebal pipa, tebal toleransi korosi, tebal *concrete*, toleransi tebal fabrikasi, dan tebal *coating*.

### 2.2.2. Teori Tegangan Pipa

Untuk mengetahui kelayakan operasi pada suatu sistem *pipeline* maka harus dilakukan analisa tegangan. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui beban yang akan diterima pada pipa dan hasil dari analisa akan dikoreksi kembali terhadap aturan-aturan yang ada dalam *code* desain pipa yang digunakan.

#### 2.2.2.1. Beban Pada Sistem Perpipaan

Sistem perpipaan pada saat operasi akan mengalami beban yang sangat banyak seperti:

1. Beban sustain, merupakan beban yang bekerja pada sistem perpipaan secara terus-menerus. Beban sustain merupakan beban dari kombinasi tekanan internal dari *fluida service* dan berat dari fluida itu sendiri.
2. Beban occasional, merupakan beban dinamis yang bekerja pada sistem perpipaan seperti beban angin dan gempa.
3. Ekspansi termal, merupakan beban yang disebabkan perbedaan temperatur antara temperatur fluida dengan temperatur dinding pipa.

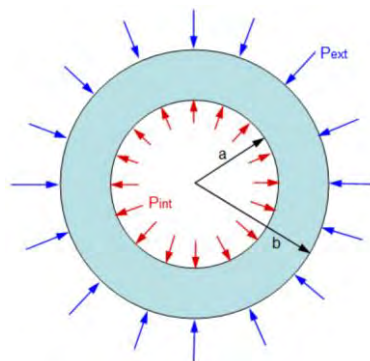
#### 2.2.2.2. Teori Tegangan Pada Sistem Pipa

Beban yang bekerja pada sistem perpipaan akan menyebabkan tegangan pada dinding pipa. Kombinasi dari tegangan yang disebabkan tekanan internal dan perbedaan temperatur akan menyebabkan defleksi pada pipa. Besarnya tegangan akibat beban operasi tekanan internal *fluida service* yang dialirkan dapat diturunkan dari persamaan mekanik untuk bejana tekan berdinding tipis (Popov, 1978).

Secara teoritis tekanan *hoop* dan longitudinal yang bekerja pada pipa sama dengan tekanan yang terjadi pada bejana tekan berdinding tipis.

#### 2.2.3. Tegangan hoop

Tegangan hoop merupakan tegangan yang diakibatkan tekanan internal pipa. Arah dari tegangan hoop adalah tangensial atau *circumferential*. Tegangan hoop tergantung dari ketebalan dinding pipa dan selisih antara tekanan eksternal dengan tekanan internal.



**Gambar 2.4.** *Hoop stress* pada pipa (Norris, 2009)

Berdasarkan ASME B31. 3 2002, Hoop stress dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_h = \frac{\Delta P \times D_o}{2 \times t} \quad (2.3)$$

Dengan:

$\Delta P$  = selisih antara tekanan eksternal dengan tekanan internal (Mpa)

$t$  = tebal minimum pipa (mm)

$D_o$  = overall diameter (sudah mencakup tebal *corrosion allowance*, tebal *coating*, dan tebal *concrete*) (mm)

untuk *onshore pipeline*, tekanan eksternal umumnya diasumsikan tidak ada atau nol.

#### 2.2.4. Gaya Aksial Kompresif

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa upheaval buckling terjadi karena gaya aksial efektif yang bekerja pada sistem *pipeline*. Gaya aksial efektif ini bekerja pada sumbu pipa sehingga dapat terjadi defleksi secara global ke arah vertikal. Gaya aksial merupakan kombinasi dari tegangan kompresif akibat pengaruh perbedaan temperatur pada saat operasi dan saat instalasi dengan tegangan kompresif akibat perbedaan tekanan internal dan tekanan eksternal. Pada pipa tertahan (*restrained*) maka pada dinding pipa akan terbentuk tegangan kompresif pada arah longitudinal.

Gaya aksial efektif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (DnV 110, 2007)

$$F_x = A_s \times E \times \epsilon_x \quad (2.4)$$

Dengan:

$F_x$  = gaya aksial (N)

$A_s$  = luas area pipa pada potongan melintang (m<sup>2</sup>)

$\epsilon_x$  = Axial strain

Mengingat bahwa,

$$A_s = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_x = \alpha \times \Delta T + \frac{1}{E} \times (\sigma_x - \nu(\sigma_h + \sigma_r)) \quad (2.6)$$

$$\Delta T = T_p - T_i \quad (2.7)$$

Dengan:

E = Modulus Young

$\alpha$  = koefisien ekspansi termal

$T_p$  = temperatur maksimum saat operasi

$T_i$  = Temperatur instalasi

$\sigma_h$  = *Hoop stress*

$\sigma_r$  = *Radial stress*

$\sigma_x$  = *Axial stress*

$\nu$  = *Poisson ratio*

tegangan aksial yang disebabkan oleh perbedaan tekanan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_x = \frac{P_i \times D_i^2 - P_o \times D_e^2}{D_e^2 - D_i^2} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan distribusi *Lame stress*, tegangan hoop dan tegangan radial dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma_h = \frac{P_i \times D_i^2 - P_o \times D_e^2 + \frac{D_i^2 \times D_e^2}{D^2} \times (P_i - P_o)}{D_e^2 - D_i^2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_r = \frac{P_i \times D_i^2 - P_o \times D_e^2 - \frac{D_i^2 \times D_e^2}{D^2} \times (P_i - P_o)}{D_e^2 - D_i^2} \quad (2.10)$$

Dengan:

D = Diameter pipa yang akan ditinjau

$P_o$  = Tekanan eksternal

$P_i$  = Tekanan internal



Dengan mensubstitusikan semua persamaan tegangan aksial, tegangan hoop, dan tegangan radial ke persamaan gaya aksial, maka akan didapat kombinasi tekanan akibat perbedaan temperatur dan perbedaan tekanan. Kombinasi dari tekanan tersebut disebut gaya aksial efektif.

$$\sigma_{ax} = \frac{\pi}{4} E \alpha_s (T_p - T_i) (D_e^2 - D_i^2) + \frac{\pi}{4} (1 - 2\nu) (P_i x D_i^2 - P_o x D_e^2) \quad (2.11)$$

$\sigma_{ax}$  = Gaya aksial efektif

*Upheaval buckling* terjadi akibat kombinasi dari gaya tekan akibat kompresi termal dan gaya tekan akibat perbedaan tekanan,

$$F_t = \frac{\pi}{4} x E x \alpha_s x (T_p - T_i) (D_e^2 - D_i^2) \quad (2.12)$$

$$F_p = \frac{\pi}{4} (1 - 2\nu) (P_i x D_i^2 - P_o x D_e^2) \quad (2.13)$$

### 2.2.5. Tanah

Istilah jenis-jenis tanah seperti kerikil, pasir, lanau, dan lempung biasanya digunakan dalam teknik sipil untuk membedakan jenis tanah. Namun pada kondisi di alam, tanah dapat terdiri dari dua atau lebih campuran jenis-jenis tanah dan ada pula dari bahan organik. Dalam penamaan jenis tanah, nama campurannya dipakai sebagai nama tambahan dibelakang material tersebut. Sebagai contoh tanah lempung berlanau merupakan tanah lempung yang mengandung lanau, dengan material utamanya adalah tanah lempung, sedangkan campurannya adalah lanau. Menurut Robyadiansyah (2008), tanah berbutir kasar dapat diidentifikasi berdasarkan ukuran butiran. Butiran yang berdiameter melebihi 2mm dapat diklasifikasikan sebagai kerikil. Jika butiran dapat dilihat oleh mata, tapi ukurannya kurang dari 2mm dapat disebut pasir. Sedangkan untuk mendefinisikan tanah lanau dengan lempung harus dilakukan uji spesimen. Tanah basah diambil dan dicetak lalu dikeringkan, kemudian dipecah kedalam fragmen-fragmen yang berukuran kurang lebih 3,1mm. Fragmen lempung dapat dipecahkan jika ditekan dengan usaha yang relatif besar, sedangkan fragmen lanau dapat dipecahkan dengan usaha yang relatif mudah.

#### **2.2.5.1. Sifat-Sifat Teknis Tanah**

Perbedaan jenis-jenis tanah mengakibatkan perbedaan pada sifat-sifat teknis tanah bila diberikan beban. Tanah granuler seperti pasir, krikil, batuan dan campurannya mempunyai sifat-sifat teknis yang sangat baik. Sifat tanah granuler antara lain:

1. Merupakan jenis tanah yang baik untuk mendukung bangunan dan badan jalan, karena mempunyai kapasitas dukung yang tinggi dan penurunan yang kecil, sifat ini akan optimal bila tanah dipadatkan. Penurunan dapat terjadi bila terdapat getaran dengan frekuensi yang cukup tinggi.
2. Merupakan jenis tanah yang baik digunakan sebagai tanah urug pada dinding penahan tanah karena menghasilkan tekanan lateral yang kecil.
3. Kerikil adalah material granuler yang biasanya bercampur dengan pasir. Dengan bercampurnya dua jenis tanah granuler tersebut maka bercampur pula butiran besar dengan butiran yang kecil. Ukuran butiran yang saling mendesak dan dipadatkan akan sangat kuat gaya gesernya.

#### **2.2.5.2. Tanah Kohesi**

Jenis tanah pada di dasar laut mengindikasikan bahwa tanah yang berada pada dasar laut banyak mengandung air. Kondisi tersebut membuat butiran-butiran tanah menjadi halus. Jenis tanah kohesif seperti lempung, lempung berlanau, lempung berpasir atau berkerikil sering dijumpai di dasar laut.



**Gambar 2.5. Silty sand**

Tanah-tanah kohesif umumnya memiliki sifat teknis sebagai berikut:

1. Bila basah bersifat plastis dan mudah turun.

2. Memiliki gaya geser yang rendah karena friksi yang rendah.
3. Merupakan material kedap air.
4. Gaya geser akan semakin menurun bila air semakin bertambah.

Dengan sifat tanah kohesif yang memiliki gaya geser yang rendah karena friksi tanah yang kecil, maka pada saat penimbunan sistem *offshore pipeline*, kedalaman timbunan harus dianalisa dengan baik sehingga tanah dapat menahan gaya aksial efektif yang terjadi pada pipa.

#### **2.2.5.3. Gaya Tekan Tanah**

Pada sistem *pipeline* yang ditimbun baik itu di *onshore* maupun *offshore*, menganalisa jenis tanah yang digunakan untuk menimbun pipa sangat penting untuk dilakukan agar desain *pipeline* yang dibuat terhindar dari kegagalan seperti *upheaval buckling*. Tanah dapat kehilangan tegangan efektifnya akibat meningkatnya tekanan air pori secara berlebihan (Yunita, 2008). Tanah merupakan elemen penting dalam instalasi pipa dengan cara *buried pipeline*. Gaya tekan yang dihasilkan oleh tanah dapat menahan gaya aksial efektif pipa sehingga pipa dapat terhindar dari fenomena *upheaval buckling*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *upheaval buckling* terjadi akibat gaya aksial efektif yang bekerja pada pipa, pada saat pipa berada dalam kondisi tertahan, maka pipa tidak dapat berekspansi ke arah longitudinal dan merubah gaya aksial menjadi gaya vertikal keatas menekan tanah. Apabila gaya tekan tanah tidak dapat menahan gaya vertikal tersebut, maka akan terjadi deformasi global yang menyebabkan pipa mencuat keatas tanah. Tanah akan menekan pipa sekaligus menopang pipa agar tidak turun pada saat pipa ditanam. Dalam memodelkan *buried pipe*, penulis menggunakan software AutoPIPE V8i untuk menghitung tekanan tanah yang terjadi pada pipa.

##### **1. Tekanan Tanah Vertikal Atas (*Transverse Vertical Up*)**

Gaya tekan tanah sangat bergantung pada jenis tanah yang digunakan untuk menimbun pipa. Perbedaan jenis tanah membuat koefisien friksi tanah juga berbeda, variabel friksi tanah inilah yang berperan untuk mendapatkan tahanan

antara dinding pipa yang langsung bersentuhan dengan tanah. Gaya tahanan yang menekan gaya aksial efektif merupakan kombinasi antara berat tanah itu sendiri dengan berat pipa yang ditanam. Gaya tekan tanah (*uplift resistance*) akan menahan pipa agar tidak bergerak keatas (*upward pipe movement*). *Uplift resistance* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Fan, 2013):

$$q_s = \rho_b \times g \times D_o \times H(1 + f \frac{H}{D_o}) \quad (2.14)$$

Dengan:

$D_o$  = Overall diameter

$\rho_b$  = Massa jenis tanah penimbun (tergantung jenis tanah penimbun)

$f$  = Koefisien *uplift resistance* (sand = 0,5 dan clay = 0,1)

$H$  = Tinggi minimum penimbunan dihitung dari titik tengah pipa.

$q_s$  = *Uplift resistance*

sedangkan tinggi minimum penimbunan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$H = H_b - (\frac{D_e}{2} + T_{cor} + T_{conc}) \quad (2.15)$$

Dengan:

$H_b$  = kedalaman penimbunan (*burrial depht*)

$T_{cor}$  = tebal *corrosion coating*

$T_{conc}$  = tebal *concrete coating*

$D_e$  = diameter eksternal

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, *uplift resistance* merupakan kombinasi dari gaya tekan tanah dengan berat pipa yang dikubur. Berat pipa yang dikubur adalah

gabungan antara berat material pipa dengan berat fluida service. Berat pipa yang tertimbun dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$W_s = (M_{coating} + M_{steel} + M_{content})g - F_b \quad (2.16)$$

Dengan:

$W_s$  = bera pipa yang tertimbun

$M_{coating}$  = masa *coating* (massa corosion coating dengan massa concrete coating)

$M_{steel}$  = massa material pipa

$M_{content}$  = massa fluida service

$F_b$  = *buoyancy force*

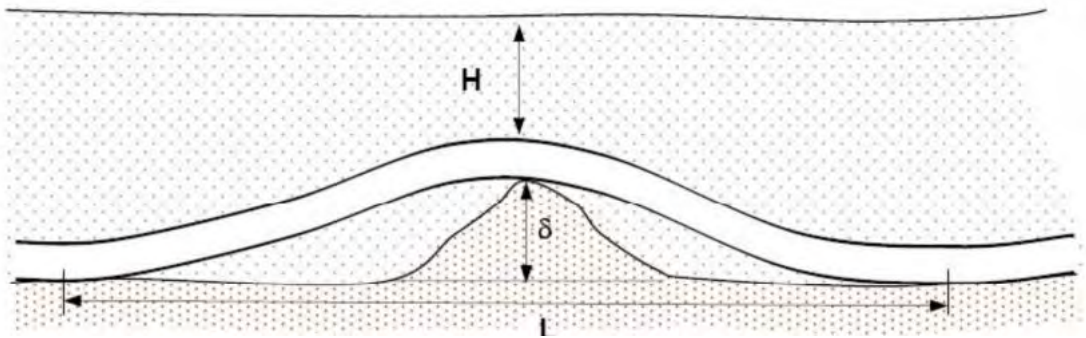
mengingat bahwa *buoyancy force* dapat dihitung menggunakan persamaan

$$F_b = \frac{\pi}{4} \times D_o^2 \times \rho_{air\ laut} \times g \quad (2.17)$$

Dengan mengkombinasikan berat pipa dengan gaya tekan tanah, maka didapat gaya tekan efektif tanah terhadap pipa. Gaya tekan efektif inilah yang berfungsi untuk menahan gaya aksial efektif pipa agar pipa tidak mengalami deformasi keatas yang besar (*upheaval buckling*). Gaya tekan tanah efektif dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$q = q_s + W_s \quad (2.18)$$

Kondisi dasar laut yang tidak rata atau *imperfection height* dapat mempengaruhi deformasi awal pipa. Deformasi tersebut berupa lekukan keatas yang diakibatkan dasar laut yang tidak rata. Dengan adanya lekukan awal tersebut membuat pipa lebih mudah mengalami *upheaval buckling*.



**Gambar 2.6.** Gaya tekan tanah terhadap *imperfection height* (Pertamina, 2012)

Dengan pipa yang berbentuk melengkung keatas, maka timbul panjang ketidaksempurnaan (*imperfection length*) akibat dasar laut yang tidak rata. Panjang ketidaksempurnaan merupakan setengah panjang pipa melengkung keatas akibat dasar laut yang tidak rata. *Imperfection length* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Fan, 2013):

$$L_o = \left( \frac{72 \times EI \times \delta_f}{W_s} \right) \quad (2.19)$$

Dengan:

$\delta_f$  = tinggi *imperfection height*

$W_s$  = berat pipa tertimbun

## 2. Daya Dukung Tanah (*Transverse Vertical Down*)

Daya dukung vertikal yang diberikan tanah terhadap pipa agar tidak terjadi penurunan (*downward pipe movement*) dapat dijelaskan dalam teori daya dukung konvensional. Pada kondisi *buried pipe*, pipa diasumsikan sebagai pondasi silinder panjang. Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan beban dari sebuah konstruksi (unipar). Besarnya daya dukung tanah tergantung dari jenis tanah dan karakter tanah. Tanah kohesi seperti lempung berlumpur (*silty clay*), dan pasir berlumpur (*silty sand*) merupakan tanah yang memiliki friksi yang kecil terhadap material. Profil yang basah membuat butiran-butiran tanah menjadi halus sehingga bersifat plastis dan mudah turun. Daya dukung tanah

dapat dihitung dengan menggunakan teori *Limit Equilibrium Method* oleh Terzaghi (1943), Meyerhof (1963), Hansen (1970), dan Vesic (1973) yaitu mengasumsikan tanah berlapis menjadi tanah homogen atau satu lapis. Namun pada kenyataannya dilapangan jenis tanah homogen jarang dijumpai, sehingga daya dukung pondasi pada tanah berlapis harus ditinjau lebih lanjut.

Pada tahun 1974 Meyerhof menyempurnakan teorinya dengan mempertimbangkan beberapa faktor dalam menentukan daya dukung tanah. Faktor-faktor tersebut adalah pengaruh kedalaman pondasi, bentuk pondasi, dan kemiringan beban. Persamaan daya dukung tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_1 = D_o \times \gamma \times \left( \frac{1}{2} \times D_o \times N_c + H_b \times N_q \right) \quad (2.20)$$

Dengan:

$P_1$  = daya dukung tanah

$D_o$  = overall diameter

$N_c, N_q$  = faktor daya dukung tanah

$\gamma$  = berat efektif tanah

$H_b$  = kedalaman penimbunan (*burrial depth*)

Faktor daya dukung tanah dapat ditentukan dengan menggunakan tabel daya dukung tanah Meyerhof sebagai berikut,

**Tabel 2.1.** Daya dukung tanah Mayerhof (Lim, 2013)

$\phi'$ (deg)	Nc	Nq	N $\gamma$	$\phi'$ (deg)	Nc	Nq	N $\gamma$
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	8.00
1	5.38	1.09	0.002	27	23.94	13.20	9.46
2	5.63	1.20	0.01	28	25.8	14.72	11.19
3	5.90	1.31	0.02	29	27.86	16.44	13.24
4	6.19	1.43	0.04	30	30.14	18.40	15.67
5	6.49	1.57	0.07	31	32.67	20.63	18.56
6	6.81	1.72	0.11	32	35.49	23.18	22.02
7	7.16	1.88	0.15	33	38.64	26.09	26.17
8	7.53	2.06	0.21	34	42.16	29.44	31.15
9	7.92	2.25	0.28	35	46.12	33.30	37.15
10	8.35	2.47	0.37	36	50.59	37.75	44.43
11	8.80	2.71	0.47	37	55.63	42.92	53.27
12	9.28	2.97	0.60	38	61.35	48.93	64.07
13	9.81	3.26	0.74	39	67.87	55.96	77.33
14	10.37	3.59	0.92	40	75.31	64.20	93.69
15	10.98	3.94	1.13	41	83.86	73.90	113.99
16	11.63	4.34	1.38	42	93.71	85.38	139.32
17	12.34	4.77	1.66	43	105.11	99.02	171.14
18	13.10	5.26	2.00	44	118.37	115.31	211.41
19	13.93	5.80	2.40	45	133.88	134.88	262.74
20	14.83	6.40	2.87	46	152.1	158.51	328.73
21	15.82	7.07	3.42	47	173.64	187.21	414.32
22	16.88	7.82	4.07	48	199.26	222.31	526.44
23	18.05	8.66	4.82	49	229.93	265.51	674.91
24	19.32	9.60	5.72	50	266.89	319.07	873.84
25	20.72	10.66	6.77				

### 3. Gaya Resistan Tanah Melintang

Defleksi melintang pada pipa yang ditimbun dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan tekanan tanah lateral pada tanah kohesif. Deformasi pipa kearah melintanng akibat gaya aksial efektif akan ditahan dengna gaya resistan tanah melintang. Kekuatann resistan tanah sangat bergantung pada tanah penimbun dipadatkan atau tidak. Penimbunan pipa dengan tanah yang dipadatkan (*compacted*) akan menyebabkan resistan tanah semakin baik untuk menahan deformasi pipa. Sedangkan tanah *uncompacted* tidak memiliki friksi yang cukup untuk menahan deformasi pada pipa. Perhitungan gaya resistan tanah melintang untuk jenis tanah *clay* dengan *sand* berbeda. Perhitungan gaya resistan tanah untuk *burried pipe* dengan jenis tanah *clay* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{tc} = R_c x S_u x D_o \quad (2.21)$$

Dengan:



$P_{tc}$  = resistan tanah melintang (jenis tanah *clay*)

$R_c$  = koefisien resistan tanah (jenis tanah *clay*)

$S_u$  = *undrained shear strength*

$D_o$  = *overall diameter*

Nilai dari koefisien resistan tanah  $R_c$  bervariasi menurut kedalaman dan jenis tanahnya. Penentuan resistansi tanah dapat ditentukan dengan hubungan kedalaman penimbunan dengan diameter eksternal pipa. Perbandingan antara kedalaman timbunan dan diameter eksternal pipa dengan nilai resistansi tanah dipaparkan dalam tabel dibawah ini,

**Tabel 2.2.** Nilai  $R_c$  (Manual AutoPIPE)

H/d	$R_c$
1	2.0
2	3.5
3	4.5
4	5.3
5	6.0
6	6.7
8	8.0
10	8.2
$\geq 12$	9.0
H = depth from ground surface to bottom of pipe	
d = pipe diameter	

Sedangkan perhitungan resistansi tanah untuk menahan defleksi pipa arah melintang pada jenis tanah pasir (*sand*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$P_{ts} = R_s \times D_o \times H \times \gamma \quad (2.22)$$

Dengan:

$P_{ts}$  = gaya resistansi tanah melintang (jenis tanah *sand*)

$R_s$  = koefisien resistansi tanah (jenis tanah *sand*)

$D_o$  = *overall diameter*

H = tinggi minimum penimbunan dihitung dari titik tengah pipa.

$\gamma$  = berat efektif tanah.

Sama dengan nilai  $R_c$ , nilai gaya resistan tanah melintang untuk jenis tanah sand merupakan hubungan antara perbandingan kedalaman penimbunan dan diameter pipa dengan nilai resistan tanah untuk jenis tanah pasir. Hubungan tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini,

**Tabel 2.3.** Nilai  $R_s$  (Manual AutoPIPE)

H/d	R <sub>s</sub> at Various Relative Densities		
	Loose	Medium-Dense	Dense
1	2.7	3.9	5.7
2	3.0	4.5	6.9
3	3.8	5.9	9.6
4	4.5	7.2	11.9
5	5.0	8.2	13.7
6	5.4	8.9	15.2
8	6.0	10.0	17.2
10	6.4	10.7	18.6
12	6.6	11.3	19.6
H = depth from ground surface to bottom of pipe			
d = pipe diameter			

#### 4. Gaya Resistan Tanah Longitudinal

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, gaya resistan tanah harus dapat menahan defleksi longitudinal pada pipa. sama halnya dengan gaya resistan tanah melintang, resistan tanah longitudinal juga dibedakan perhitungannya berdasarkan jenis tanah yang dipakai menimbun. Berikut adalah perhitungan gaya resistan tanah dengan jenis tanah *sand*,

$$P_{LS} = \pi \times D_o \times k_s \times H \times \gamma \times \tan \delta \quad (2.23)$$

Dengan:

$P_L$  = gaya resistan tanah longitudinal

$D_o$  = *overall diameter*

$k_s$  = koefisien tanah lateral (untuk pasir *uncompacted* harga  $k_s$  bernilai 0,25, sedangkan pasir *compacted* harga  $k_s$  berkisar antara 0,5 – 1,0)

$\delta$  = sudut antara friksi tanah dengan permukaan material pipa

sedangkan perhitungan gaya resistan tanah untuk tanah *clay* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$P_{LC} = \pi \times D_o \times \alpha \times S_u \quad (2.24)$$

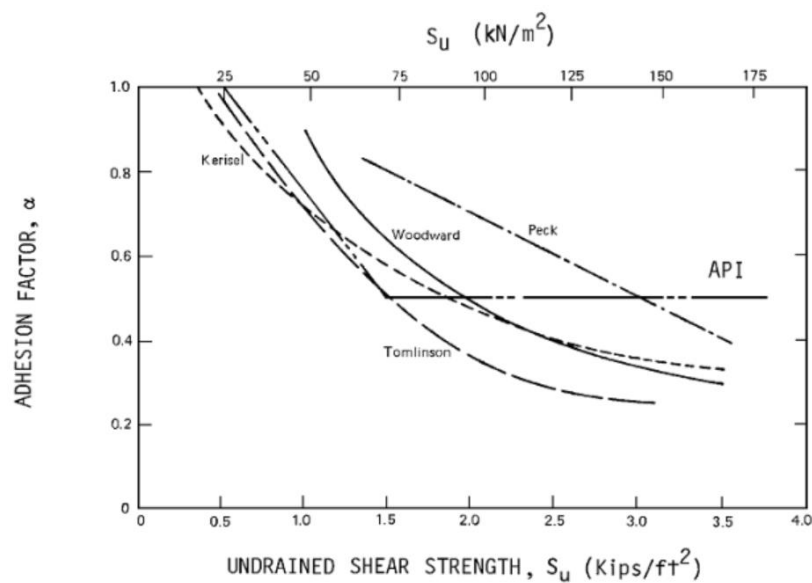
Dengan:

$P_{LC}$  = gaya resistan tanah (jenis tanah *clay*)

$\alpha$  = faktor rekatan (*adhesion factor*)

$S_u$  = *undrained shear strength*

Berdasarkan API harga  $\alpha$  dapat ditentukan dengan grafik hubungan *adhesion factor* dengan *undrained shear strength* sebagai berikut



**Gambar 2.7.** Grafik *adhesion factor* (Manual AutoPIPE)

Agar lebih sederhana berikut adalah tabel perbedaan persamaan untuk perhitungan tahanan tanah dari jenis tanah liat dan tanah berpasir,

**Tabel 2.4.** Persamaan *soil resistance* horizontal dan longitudinal (Manual AutoPIPE)

Jenis tanah	Transverse horizontal	Transverse longitudinal
Sand	$p_{th} := R_s \cdot D \cdot z_0 \cdot \gamma_e$	$p_l := \pi \cdot D \cdot k_s \cdot z_0 \cdot \gamma_e \cdot \tan(\delta_x)$
Clay	$p_{th} := D \cdot R_c \cdot S_u$	$p_l := \pi \cdot D \cdot a_d \cdot S_u$

**Tabel 2.5.** Persamaan *soil resistance* vertikal up dan vertikal down (Manual AutoPIPE)

Jenis tanah	Transverse vertikal up	Transverse vertikal doown
Sand	$p_{tvu} := w_s + D \cdot d_b \cdot \gamma_e \cdot F_q$	$p_{tvd} := D \cdot \gamma_e \cdot (0.5 \cdot D \cdot N_g + h_0 \cdot N_q)$
Clay	$p_{tvu} := w_s + D \cdot \left( F_c \cdot \frac{S_u}{g} + d_b \cdot \gamma_e \cdot F_q \right)$	$p_{tvd} := D \cdot \left( \frac{1}{2} D \cdot \gamma_e \cdot N_q \cdot g + S_u \cdot N_c \right)$

#### 2.2.6. Dawnward Resistance

Dalam menahan deformasi arah vertikal pengaruh berat tanah, *fluida service*, dan pipa sangat besar. Agar upheaval buckling tidak terjadi analisa *dawnward resistance* dan *overburden resistance* perlu dilakukan. *Dawanward resistance* adalah kekakuan tanah arah vertikal yang menahan gaya aksial efektif bila pipa mengalami deformasi awal akibat initial slope atau *imperfection height*. Nilai dari *imperfection height* tergantung dari batas tinggi *imperfection height* yang dikeluarkan oleh perusahaan, batas *imperfection height* dari PT. UBE adalah 7,5 m. Menurut DnV RP F101 Dawnward resistance dapat dihitung dengan mencari terlebih dahulu *dawnward parameter*, dan *lenght parameter* dari *imperfection length* yang telah ditentukan. Dalam menentukan *imperfection length* dan *lenght parameter* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$L_o = \left( 72 \times E \times I \frac{\sigma_{ax}}{w_s} \right) \quad (2.25)$$

Dengan:

$L_o$  = Imperfection length

$\delta_f$  = tinggi *imperfection height*

$W_s$  = berat pipa tertimbun

Sedangkan untuk menentukan *length parameter* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$\Phi_{Lo} = L_o \sqrt{\frac{\sigma_{ax}}{E I}} \quad (2.26)$$

Dengan:

$\Phi_{Lo}$  = *Length parameter*

$L_o$  = *Imperfection length*

$\sigma_{ax}$  = Gaya aksial efektif

$E$  = Moudulus Young

$I$  = Inersia

Dengan mengetahui harga *length parameter* akan diketahui *dawnward parameter* dengan menggunakan persamaan sebagai beerikut,

$$\Phi_{Wo} = \begin{cases} 0,0646 & \text{jika } \Phi_{Lo} < 4,9 \\ \frac{5,68}{\Phi_{Lo}^2} - \frac{88,35}{\Phi_{Lo}^4} & \text{jika } 4,49 \leq \Phi_{Lo} \leq 8,06 \\ \frac{9,6}{\Phi_{Lo}^2} - \frac{343}{\Phi_{Lo}^4} & \text{jika } 4,49 \leq \Phi_{Lo} \geq 8,06 \end{cases} \quad (2.27)$$

Dengan mengetahui *dawnward parameter*, maka *dawnward resistance* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$W_o = \frac{\Phi_{Wo}}{E I} \delta_f \times \sigma_{ax} \quad (2.28)$$

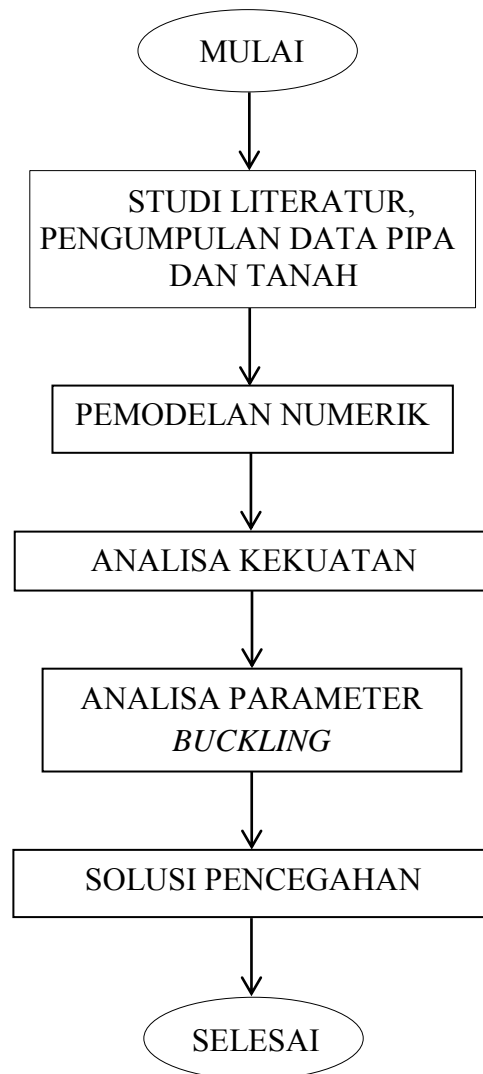
Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB III

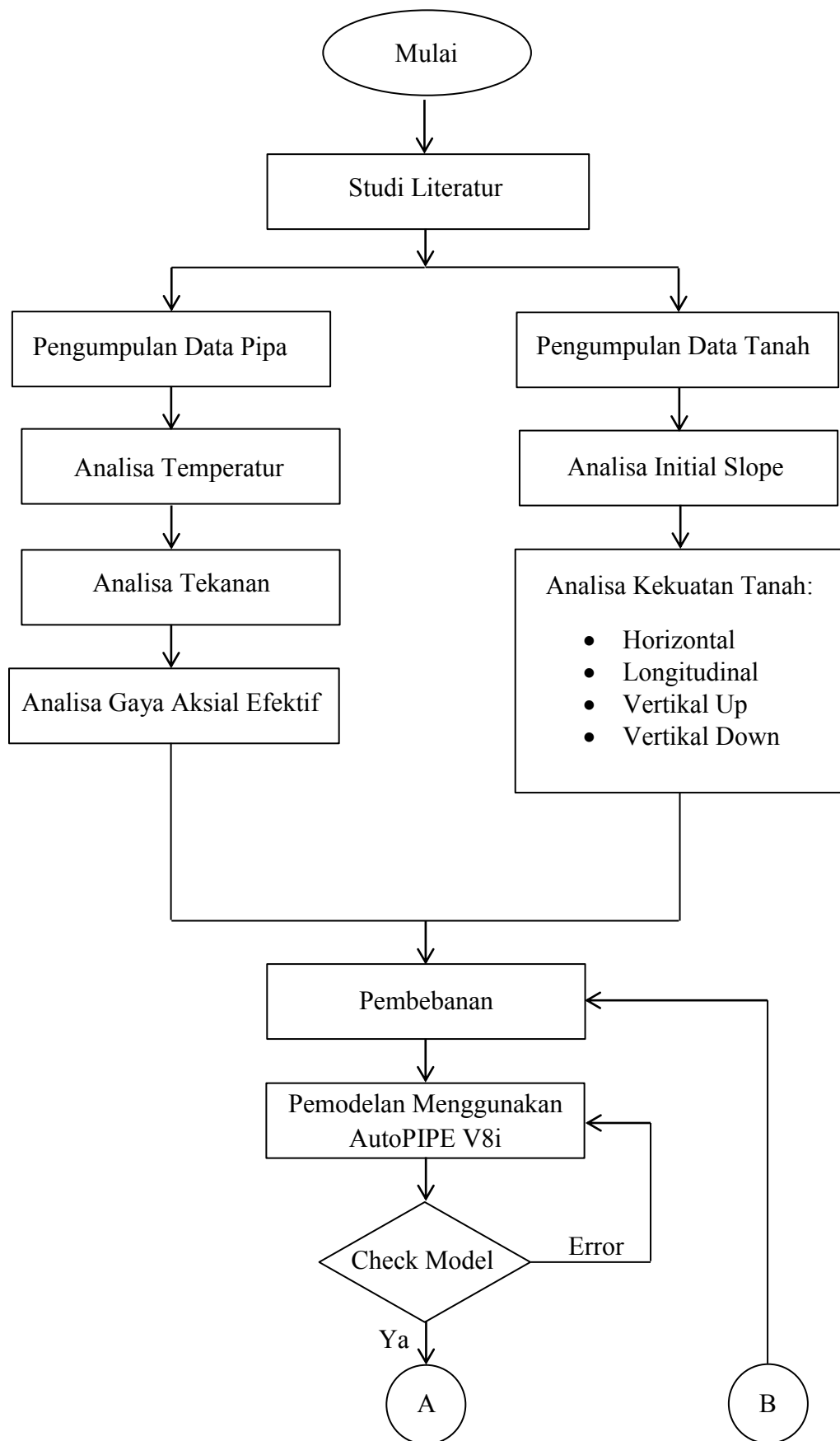
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Metode Penelitian

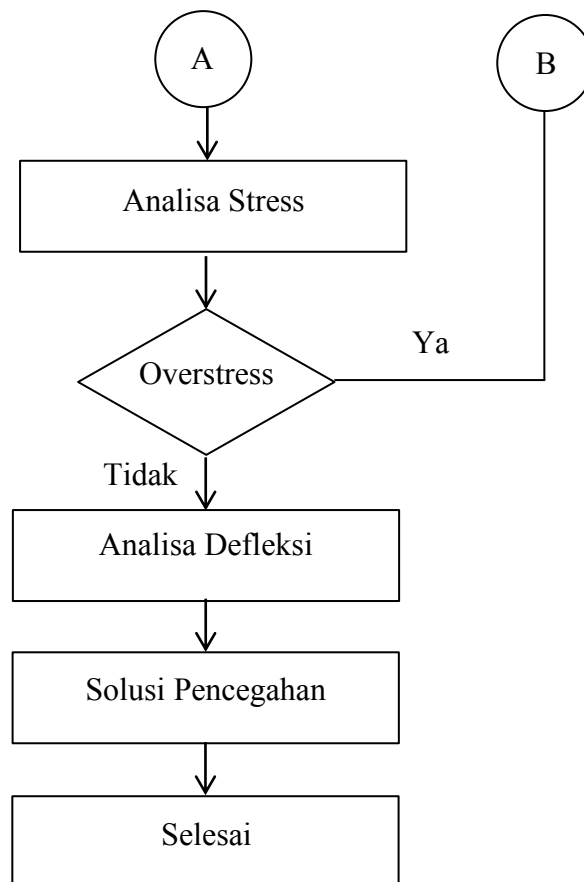
Dalam melakukan penelitian ini, penulis melakukan perhitungan secara teoritis, dengan mengacu pada teori-teori yang telah dipaparkan dalam tinjauan pustaka. Berikut adalah diagram alir metode penelitian yang akan dilakukan:



**Gambar 3.1.** Diagram alir pengerjaan tugas







**Gambar 3.2.** Prosedur pengerjaan tugas akhir.

### 3.2. Prosedur Pengerjaan

Prosedur penelitian dalam menganalisa mekanisme *upheaval buckling* terhadap variasi jenis tanah pada sistem pipeline yang dimiliki oleh PT. UBE (*Universal Batam Energy*) adalah sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Mengumpulkan sejumlah literatur yang dipakai dapat berupa jurnal penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, buku teks, *code*, dan sumber dari media elertronik maupu cetak. Materi yang dicari meliputi mekanisme terjadinya buckling, parameter buckling, dan kekuatan tanah maupun tekanan tanah.

#### 2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari dari berbagai sumber. Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis mengumpulkan data dari PT.

ZEE Indonesia. Dari data yang sudah terkumpul, maka akan dilakukan analisa kekuatan tahanan tanah (*soil resistance*) dan analisa gaya aksial efektif yang terjadi pada pipa. analisa kedua variabel ini dapat dilakukan secara terpisah, tidak saling terkait.

### 3. Analisa Kekuatan Tanah

Pada analisa *soil resistance*, penulis mengacu pada manual *software* AutoPIPE. Input tanah untuk memodelkan *buried pipe* (pipa yang ditanam) pada AutoPIPE adalah dengan melakukan perhitungan tahanan tanah horizontal, tahanan tanah longitudinal, tahanan tanah vertikal up, tahanan tanah vertikal down. Keempat variabel tahanan tanah ini merupakan pemodelan properti tanah agar dapat dimodelkan di *software* AutoPIPE.

### 4. Analisa Temperatur dan Tekanan

Temperatur dan tekanan merupakan dua variabel penting dalam menentukan gaya aksial efektif pada pipa. Semakin besar perbedaan temperatur instalasi dengan temperatur saat operasi akan mengakibatkan pipa mengalami elongasi. Sama halnya dengan tekanan, analisa tekanan yang dimaksud adalah analisa tekanan akibat perbedaan temperatur dan perbedaan tekanan internal dan tekanan eksternal.

### 5. Analisa Gaya Aksial Efektif

Penyebab utama dari *upheaval buckling* adalah gaya aksial efektif. Gaya aksial efektif merupakan gabungan dari tegangan yang terjadi pada pipa seperti tegangan hoop, tegangan longitudinal, dan tegangan poisson. Ketiga tegangan ini mempunyai pengaruh besar terhadap terjadinya *upheaval buckling* selain initial slope yang disebabkan oleh ketidakrataan tanah.

### 6. Pembebanan

Pada tahap ini adalah menganalisa hubungan antara tekanan tanah dengan gaya aksial efektif. Pipa sudah dikenai beban tanah dan beban gaya aksial

efektif. Hubungan tersebut berupa safety factor dari perbandingan antara *total resistance* dengan *download resistance*. Total resistance adalah tekanan tanah atau tahanan tanah yang diberikan oleh tanah penimbun untuk menahan defleksi vertikal keatas, sedangkan download resistance adalah variabel gaya yang sudah dipengaruhi oleh *imperfection height* dan gaya aksial efektif.

#### 7. Pemodelan

Pemodelan *pipeline* dengan panjang mencapai  $\pm 12$  km dilakukan menggunakan software AutoPIPE. Pemodelan dilakukan dengan asumsi bahwa pipa dipasang meletak tanpa adanya *anchor* atau pondasi. *Anchor* dipasang pada ujung-ujung pipa. Dengan memasukkan variabel-variabel tebal pipa, temperatur, tekanan, tanah dan lain-lain maka akan diketahui *stress range* disetiap segmen. Apabila rasio stress dengan *allowable stress* melebihi 1.0, maka pipa dinyatakan gagal.

#### 8. Analisa Defleksi dan Solusi Pencegahan

AutoPIPE dapat mengetahui rasio stress dan defleksi distiap segmen. Apabila defleksi terlalu besar disegmen-segmen tertentu, maka akan ditambhkan pondasi disegmen tersebut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB IV

### ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Data pipa

Proyek *pipeline* PT. UBE merupakan proyek pipa yang menyalurkan gas dari pulau Batam menuju pulau Tanjung Uncang untuk kepentingan pembangkit listrik tenaga gas. Sistem *pipeline* tersebut akan melewati selat yang menghubungkan kedua pulau tersebut. Data pipa dan data geoteknik terkait dengan proyek PT. UBE penulis dapatkan ketika melakukan magang di PT. ZEE Engineering. Berikut adalah data pipa dan data geoteknik,

**Tabel 4.1.** Spesifikasi pipa (ZEE Engineering, 2013)

Panjang sistem <i>pipeline</i>	± 12,6 km
Diameter pipa	16 inch
Tebal pipa	0,5 inch
<i>Material grade</i>	Schedule API 5L Grade X60 NPS 16
<i>Corrosion allowance</i>	1 mm
Toleransi fabrikasi	0,7 mm
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Rasio poisson's	0,3
SMYS	415 MPa
Modulus young	201799 MPa
Koefisien ekspansi termal	11,7 x 10 <sup>-6</sup> / °C
Tebal <i>corrosion coating</i>	6 mm ( <i>Aspal Enamel</i> )
Densiti <i>corrosion coating</i>	1281,5 kg/m <sup>3</sup>
Tebal <i>concrete coating</i>	55 mm
Densiti <i>concrete coating</i>	3040 kg/m <sup>3</sup>
Panjang pipa	12,2 m

**Tabel 4.2.** Tekanan dan temperatur (ZEE Engineering, 2013)

<i>Design Pressure</i>	800 psig (55.17 barg)
<i>Operating Pressure</i>	710 psig (48.97 barg)
Design temperature	150 °F (65.56 °C)
Maximum operating temperature	113 °F (45 °C)
Hydrotest pressure (1.5 x design pressure)	1200 psig (82.76 barg)
Hydrotest temperature	77 °F (25 °C)
Sea water temperature	25 °C

**Tabel 4.3.** Spesifikasi geoteknik (ZEE Engineering, 2013)

<b>Jenis tanah</b>	<b>Silty clay</b>	<b>Silty sand</b>
Specific gravity	2.66	2.68
Submerged unit weight	7.87 kN/m <sup>3</sup>	9.03 kN/m <sup>3</sup>
Undrained shear strenght	30 kPa	N/A
Sudut internal friction	N/A	30 degree

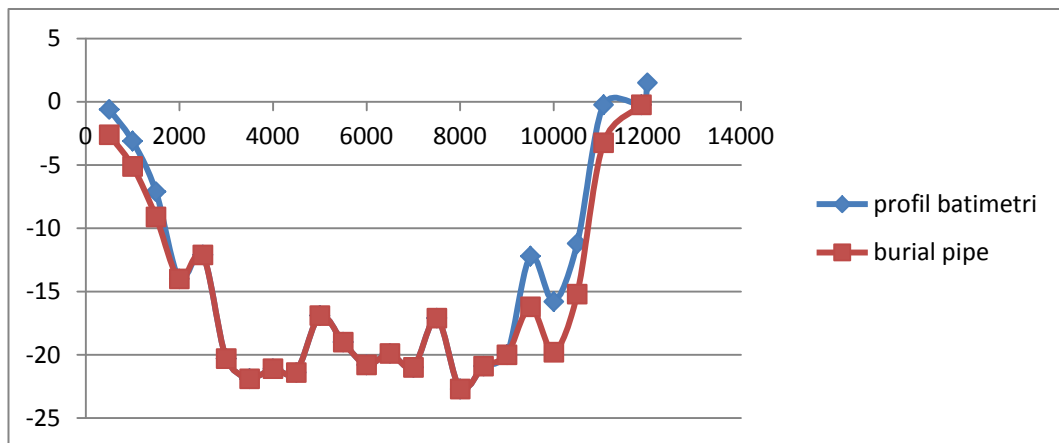
Sistem pipeline yang menyalurkan gas dari Batam hingga Tanjung Uncang memiliki panjang 12 km. Dengan panjang sedemikian rupa, kondisi tanah di offshore tidak selalu sama. Berikut adalah jenis tanah berdasarkan kilometer poin 0-12 km,

**Tabel 4.4.** Jenis tanah setiap kilometer poin (ZEE Engineering, 2013)

KP 0.0 – KP 1.0	Sand
KP 1.0 – KP 3.4	Clay
KP 3.4 – KP 4.4	Sand
KP 4.4 – KP 5.4	Clay
KP 5.4 – KP 6.3	Sand
KP 6.3 – KP 7.3	Clay
KP 7.3 – Tanjung Uncang	Sand

#### 4.2. Profil Batimetri

Kondisi *seabed* yang tidak rata membuat pipa mengalami tekanan yang berlebih apabila slope daripada profil tanah yang ekstrim. Perbedaan kontur tanah yang ekstrim dikedalaman tertentu harus diperhatikan apabila pipa dilewatkan pada kontur tersebut. Bila profil batimetri ekstrim dalam arti perbedaan ketinggian dari dalam ke dangkal sangat besar dan cenderung membentuk palung, maka *seabed* harus diratakan atau pipa *crossing*. Berikut adalah grafik batimetri yang dilewati oleh pipa PT. UBE,



**Gambar 4.1.** Grafik profil batimetri

Grafik batimetri diatas merupakan grafik yang tidak berskala, penulis memaparkan grafik yang tidak berskala karena ingin memperlihatkan kontur dasar laut agar lebih terlihat. Grafik diatas menunjukkan perubahan kondisi kontur *seabed* di setiap 500 m. Berikut adalah tabel dari grafik batimetri diatas beserta slope disetiap kemiringan konturnya,

**Tabel 4.5.** Kedalaman profil batimetri dan slope

jarak (m)	water depth (m)	burial pipe (m)	X2-X1	slope burial pipe	slope batimetri
500	-0,6	-2,6	500		
1000	-3,1	-5,1	500	-0,005	-0,005
1500	-7,1	-9,1	500	-0,008	-0,008
2000	-14	-14	500	-0,0098	-0,0138
2500	-12,1	-12,1	500	0,0038	0,0038
3000	-20,3	-20,3	500	-0,0164	-0,0164
3500	-21,9	-21,9	500	-0,0032	-0,0032
4000	-21,1	-21,1	500	0,0016	0,0016
4500	-21,4	-21,4	500	-0,0006	-0,0006
5000	-16,9	-16,9	500	0,009	0,009
5500	-19	-19	500	-0,0042	-0,0042
6000	-20,8	-20,8	500	-0,0036	-0,0036
6500	-19,9	-19,9	500	0,0018	0,0018
7000	-21	-21	500	-0,0022	-0,0022
7500	-20	-20	500	0,002	0,002
8000	-22,7	-22,7	500	-0,0054	-0,0054
8500	-20,9	-20,9	500	0,0036	0,0036
9000	-20	-20	500	0,0018	0,0018
9500	-11,2	-15,2	500	0,0096	0,0176
10000	-15,8	-19,8	500	-0,0092	-0,0092
10500	-11,2	-15,2	500	0,0092	0,0092
11063	-0,227	-3,227	500	0,023946	0,021946
11872	-0,227	-0,227	500	0,006	0
12000	1,5				

Tabel diatas membuktikan bahwa profil kontur yang dipaparkan pada grafik tidak ekstrim seperti yang digambarkan. Slope yang cenderung kecil pada setiap perubahan ketinggian kontur *seabed* menggambarkan seabed yang cenderung rata, maka teknik peletakan pipa hanya meletak pada pipa *ekspose* (KP 2 – KP 8) dan *buried* (KP 0.5 – KP 2 dan KP 9 – KP 10.5).

#### 4.3. Analisa Perhitungan Kekuatan Tanah

Analisa *soil restraint* (tahanan tanah) penting dilakukan khususnya untuk analisa *upheaval buckling*. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, *upheaval buckling* terjadi karena adanya gaya aksial yang besar akibat adanya perbedaan tekanan dan temperatur juga ketidakmampuan tanah untuk menahan deformasi vertikal dari pipa tersebut. Dalam analisa kekuatan tanah penulis mangacu pada pedoman perhitungan AutoPIPE V8i, DNV-RP-F110 2007 dan API RP 2A. Untuk memodelkan pipa dalam software AutiPIPE, *soil resistant input* harus dimasukkan untuk menandai bahwa pipa tersebut meletak atau tertimbun dalam tanah. Ada



empat macam tahanan tanah yang perlu dianalisa untuk memodelkan *burried pipe* dan *ekspose pipe* yaitu *transverse horizontal and longitudinal soil properties*, *transverse vertikal down*, *transverse vertikal up*. Setiap perhitungan sifat tanah berbeda tergantung jenis tanah yang dianalisa.

#### 4.3.1. Tahanan Tanah Melintang Horizontal

Tahanan tanah terhadap defleksi melintang pipa dapat diperkirakan dengan menggunakan informasi pada penelitian tiang pancang lateral. Tahanan tanah ( $P_1$ ) atau kekuatan tanah yang dapat menahan defleksi melintang pipa dapat dihitung menggunakan pendekatan teori tekanan tanah pasif. Tekanan tanah pasif adalah tekanan yang timbul pada tanah saat menerima beban struktur yang disalurkan secara lateral. Berikut adalah persamaan untuk menghitung tekanan tanah dengan jenis *clay*,

$$P_1 = R_c \times S_u \times D \quad (4.1)$$

Dengan,

$P_1$  = tahanan tanah untuk jenis tanah *clay*

$R_c$  = koefisien *transverse horizontal* untuk tanah *clay* (nilainya bervariasi dengan kedalaman, lihat tabel )

$S_u$  = *undrained shear strength*

$D$  = diameter terluar pipa

Untuk nilai koefisien *transverse horizontal* dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4.6.** Nilai koefisien transverse horizontal (Manual AutoPIPE)

H/D	$R_c$
1	2.0
2	3.5
3	4.5

4	5.3
5	6.0
6	6.7
8	8.0
10	8.2
$\geq 12$	9.0
H = kedalaman timbunan dari permukaan tanah hingga dasar pipa D = diameter terluar pipa	

Sedangkan tahanan tanah dengan jenis tanah timbunan sand dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$P_1 = R_s \times D \times Z \times \gamma' \quad (4.2)$$

Dengan,

$P_1$  = tahanan tanah untuk jenis tanah *sand*

$R_s$  = koefisien yang nilainya bervariasi dengan kedalaman timbunan dan kepadatan relatif pasir (lihat tabel...)

$Z$  = kedalaman timbunan dari permukaan tanah hingga bagian tengah pipa

$\gamma'$  = berat efektif tanah

untuk nilai  $R_s$  dapat dilihat pada tabel sebagai berikut,

**Tabel 4.7.** Nilai koefisien  $R_s$  (Manual AutoPIPE)

H/D	Loose	Medium-Dense	Dense
1	2.7	3.9	5.7
2	3.0	4.5	6.9
3	3.8	5.9	9.6

4	4.5	7.2	11.9
5	5.0	8.2	13.7
6	5.4	8.9	15.2
8	6.0	10.0	17.2
10	6.4	10.7	18.6
12	6.6	11.3	19.6
H = kedalaman timbunan dari permukaan tanah hingga dasar pipa D = diameter terluar pipa			

Analisa perhitungan tanah dilakukan pada kondisi kedalaman timbunan yang bervariasi, mulai dari 1.5 m, 2 m, dan 4 m. Sehingga dari setiap jenis tanah akan menghasilkan tiga macam tahanan tanah menurut kedalaman timbunan. Berikut adalah hasil tahanan tanah transverse horizontal untuk jenis tanah *clay* dan *loose silty sand*,

**Tabel 4.8.** Tahanan tanah transverse horizontal

<b>Jenis tanah</b> <b>Timbunan</b>	<b>Clay</b>	<b>Loose silty sand</b>	<b>R<sub>c</sub></b>	<b>R<sub>s</sub></b>
1.5 m	68376 N/m	7516.4 N/m	5.5	4.3
2.0 m	105404.4 N/m	3127 N/m	6.7	4.9
4.0 m	133722 N/m	1551 N/m	8.5	6.3
R <sub>c</sub> = koefisien <i>transverse horizontal</i> untuk tanah <i>clay</i> R <sub>s</sub> = koefisien yang nilainya bervariasi dengan kedalam timbunan dan kepadatan relatif pasir				

#### 4.3.2. Tahanan Tanah Longitudinal

Pada dasarnya tahanan tanah longitudinal sudah dijelaskan pada bab dasar teori. Tahanan tanah longitudinal juga dihitung berdasarkan variasi kedalaman yaitu 1.5 m, 2 m, dan 4 m. Untuk tanah jenis *sand*, nilai tahanan tanah (P<sub>1</sub>) dapat ditentukan melalui sudut *frictional resistance* ( $\delta$ ) antara pipa dengan tanah penimbun.

Hubungan antara sudut *internal friction* dengan sudut *frictional resistance* dapat dilihat pada tabel API RP 2A. Berikut adalah tabel sudut *internal friction* dan sudut *frictional resistance* berdasarkan jenis kepadatan tanah berpasir,

**Tabel 4.9.** Sudut friksi internal dan tahanan gesek pipa dengan tanah (Manual AutoPIPE)

Jenis pasir	$\phi$	$\delta$
Clean sand	35°	30°
Silty sand	30°	25°
Sandy silt	25°	20°
Silt	20°	15°
$\phi$ = sudut internal friksi $\delta$ = sudut tahanan gesek antara pipa dengan tanah		

Jenis loose silty sand merupakan jenis pasir yang akan dianalisa. Sedangkan untuk jenis tanah liat, tahanan tanah ( $P_1$ ) dapat dihitung dengan menganalisa faktor kerapatan tanah (*adhesion factor*). *Adhesion factor* ( $\alpha$ ) didapat pada grafik *undrained shear strength*. Berikut adalah tahanan tanah disetiap variasi kedalaman timbunan,

**Tabel 4.10.** Tahanan tanah dan properti tanah berpasir dan tanah liat (Manual AutoPIPE)

Parameter	Clay	Loose silty sand
1.5 m	40527.3 N/m	422.7 N/m
2.0 m	40527.3 N/m	747.9 N/m
4.0 m	40527.3 N/m	1398.2 N/m
$\phi$	-	30°
$\delta$	-	25°
$\alpha$	0.82	-
$S_u$	0.627 kip/ft <sup>2</sup>	-

#### 4.3.3. Transverse Vertikal Down

Dukungan vertikal yang diberikan tanah terhadap kemungkinan adanya defleksi kearah bawah pada pipa dapat dijelaskan melalui teori daya dukung tanah konvensional. Untuk tanah liat jenuh sudut internal friksi bernilai  $\phi = 10^\circ$ , Sedangkan sudut internal friksi untuk tanah berpasir bernilai  $\phi = 30^\circ$ . Mengacu pada tabel faktor daya dukung Mayerhof, maka dari kedua jenis tanah tersebut memiliki faktor daya dukung ( $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_y$ ) sebagai berikut,

**Tabel 4.11.** Faktor daya dukung tanah menurut Mayerhof (Lim, 2013)

Faktor daya dukung tanah	Clay ( $\phi = 10^\circ$ )	Loose silty sand ( $\phi = 30^\circ$ )
$N_c$	8.35	30.14
$N_q$	2.47	18.40
$N_y$	0.37	15.67

Dukungan vertikal yang diberikan tanah dihitung berdasarkan variasi kedalaman timbunan disetiap jenis tanah. Berikut adalah hasil dukungan vertikal dari jenis tanah *clay* dan *sand*,

**Tabel 4.12.** Transverse vertikal down

Kedalaman Timbunan	Clay	Loose silty sand
1.5 m	133125 N/m	8797.9 N/m
2.0 m	133125 N/m	13903.2 N/m
4.0 m	133125 N/m	24113.7 N/m

#### 4.3.4. Transverse Vertikal Up

Tekanan tanah untuk menahan gaya angkat atau defleksi vertikal keatas yang terjadi pada pipa disebut *uplift resistance*. Tekanan tersebut dangan tergantung pada berat tanah penimbun. Sehingga kedalaman penimbunan pipa sangat berpengaruh terhadap gaya tekan tanah untuk menahan defleksi vertikal keatas. Berikut adalah uplift resistance disetiap variasi kedalaman timbunan dari dua jenis tanah (*clay* dan *sand*),

**Tabel 4.13.** *Uplift resistance*

Kedalaman Timbunan	Clay	Loose silty sand
1.5 m	102770.3 N/m	13340.7 N/m
2.0 m	108154.6 N/m	20295.1 N/m
4.0 m	167866.2 N/m	40437 N/m

#### 4.4. Tebal Pipa, Tekanan, dan Temperatur

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, data ketebalan pipa didapat dari spesifiikasi pipa PT. UBE. Perhitungan ulang dilakukan penulis agar diameter dan tebal pipa sudah sesuai dengan API Spesification 5L, 2000. Dalam perhitungan ulang tebal pipa, tebal minimum pipa sebesar 3,3 mm. Perhitungan tebal minimum menunjukkan bahwa tebal yang diigunakan oleh PT. UBE (sebesar 12,7 mm) aman untuk digunakan. Untuk menentukan tebal pipa, semua perusahaan minyak dan gas bumi merujuk pada *pipe schedule*, karena produksi pipa hanya memproduksi pipa dengan diameter dan tebal-tebal tertentu. Konsep dalam menentukan tebal dan diameter pipa adalah setelah menentukan nilai tebal minimum pipa, nilai tersebut harus dicocokkan kedalam *pipe schedule* karena teerkait dalam ketersediaan barang. Apabila tidak ditemukan angka yang sesuai dengan perhitungan tebal minimum pipa, maka dipilih yang lebih besar dari tebal minimum pipa.

Table E-6C (Continued)—Plain-End Line Pipe Dimensions, Weights per Unit Length, and Test Pressures for Sizes 6<sup>5</sup>/<sub>8</sub> through 80 (SI Units)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Size	Specified Outside Diameter <i>D</i> (mm)	Specified Wall Thickness <i>t</i> (mm)	Plain-End Weight per Unit Length <i>w<sub>pe</sub></i> (kg/m)	Calculated Inside Diameter <sup>a</sup> <i>d</i> (mm)	Minimum Test Pressure <sup>b</sup> (kPa × 100) <sup>c</sup>									
					Grade A	Grade B	Grade X42	Grade X46	Grade X52	Grade X56	Grade X60	Grade X65	Grade X70	Grade X80
16	406.4	8.7	85.32	389.0	Std. 53	62	106	115	131	140	151	163	176	201
					Alt. 66	77	106	115	131	140	151	163	176	201
16	406.4	9.5	92.98	387.4	Std. 58	68	115	126	143	153	165	178	192	207
					Alt. 73	85	115	126	143	153	165	178	192	219
16	406.4	10.3	100.61	385.8	Std. 63	73	125	137	155	166	178	193	207	207
					Alt. 79	92	125	137	155	166	178	193	208	238
16	406.4	11.1	108.20	384.2	Std. 68	79	135	147	167	179	192	207	207	207
					Alt. 85	99	135	147	167	179	192	208	224	250
16	406.4	11.9	115.77	382.6	Std. 73	85	144	158	179	192	206	207	207	207
					Alt. 91	106	144	158	179	192	206	223	240	250
16	406.4	12.7	123.30	381.0	Std. 78	90	154	168	191	205	207	207	207	207
					Alt. 97	113	154	168	191	205	220	238	250	250
16	406.4	14.3	138.27	377.8	Std. 87	102	173	190	207	207	207	207	207	207
					Alt. 109	127	173	190	215	231	248	250	250	250
16	406.4	15.9	153.11	374.6	Std. 97	113	193	207	207	207	207	207	207	207
					Alt. 121	141	193	211	239	250	250	250	250	250
16	406.4	17.5	167.83	371.4	Std. 107	125	207	207	207	207	207	207	207	207
					Alt. 134	156	212	232	250	250	250	250	250	250
16	406.4	19.1	182.42	368.2	Std. 117	136	207	207	207	207	207	207	207	207
					Alt. 146	170	232	250	250	250	250	250	250	250

Gambar 4.2. Pipe schedule API spesifikasi 5L

Dalam perhitungan gaya aksial efektif, tekanan yang terjadi pada pipa yaitu sebesar 710 psig sesuai dengan MAOP (*Maximum Allowable Operating Pressure*), dan temperatur yang dipakai sebesar 45° C. Perlu diketahui PT. UBE merupakan perusahaan pembangkit listrik tenaga gas, maka *fluida service* yang dialirkan berupa gas. Gas tersebut dialirkan dari *gas plan* Batam menuju *gas plan* di Tanjung Uncang.

#### 4.5 Gaya Aksial Efektif

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, gaya aksial efektif merupakan salah satu pemicu terjadinya *upheaval buckling*. selain gaya aksial efektif, *initial slope* dapat mempermudah terjadinya *upheaval*. Gaya aksial efektif disebabkan oleh gaya poisson dan gaya ekspansi termal. Maka gaya aksial efektif disetiap kedalaman pipa nilainya dapat berbeda-beda. Pada penyusunan tugas akhir ini, pipa yang ditinjau adalah pipa tertanam (*buried pipe*). Pipeline sepanjang ±12 km yang menghubungkan pulau Batam dan Tanjung Uncang mempunyai *buried pipe* dengan panjang total ±3,1 km (1,5 km di pesisir Batam

dan 2,1 km di pesisir Tanjung Uncang). Berikut adalah hasil perhitungan gaya aksial efektif di setiap kedalaman *burried pipe*,

**Tabel 4.14.** Gaya poisson, gaya ekspansi, dan gaya aksial efektif

Kedalaman Laut	Jenis Tanah	Daerah	Gaya Poisson (N)	Gaya Ekspansi (N)	Gaya aksial Efektif (N)
3,1 m	sand	T. Uncang	$3,807 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,042 \times 10^6$
7,1 m	clay	T. Uncang	$3,776 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,04 \times 10^6$
14 m	clay	T. Uncang	$3,722 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,036 \times 10^6$
20 m	sand	Batam	$3,676 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,032 \times 10^6$
15,8 m	sand	Batam	$3,708 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,035 \times 10^6$
11,2 m	sand	Batam	$3,744 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,038 \times 10^6$
0,22 m	sand	Batam	$3829 \times 10^5$	$-6,851 \times 10^5$	$-1,044 \times 10^6$

Hasil perhitungan diatas menunjukkan bahwa setiap perubahan kedalaman laut dapat mempengaruhi gaya aksial efektif. Semakin dalam kedalaman laut, gaya aksial efektif akan semakin kecil karena perbedaan tekanan antara tekanan eksternal dan tekanan internal semakin kecil. Gaya aksial yang paling besar terjadi pada kedalaman 0,22 m sebesar  $-1,044 \times 10^6$  N dan gaya aksial yang paling kecil terjadi di kedalaman 20 m sebesar  $-1,032 \times 10^6$  N.

#### 4.6 Pembebanan

Pipa merupakan salah satu alat untuk menyalurkan minyak dan gas bumi. Dalam menyalurkan minya dan gas, pipa mendapat tekanan dari *fluida service* akibat pompa untuk menyalurkan fluida. Tidak hanya dari pompa, tapi perubahan atau perbedaan temperatur saat instalasi dengan saat operasi juga dapat mempengaruhi struktur pipa itu sendiri. Tekanan hidrostatik akibat tekanan air juga dapat menambah beban pipa. Dengan berbagai beban tersebut, pipa dapat mengalami deformasi bila pipa tidak didukung oleh struktur penopang yang cukup kuat untuk menahan semua beban tersebut. Salah satu cara untuk menahan deformasi vertikal



dapat dilakukan dengan cara menanam pipa dengan kedalaman tertentu agar pipa tidak berdeformasi keatas.

Dengan cara menanam pipa di kedalaman tertentu, beban yang dialami pipa juga bertambah. Tanah yang menimbun pipa juga dapat membebani pipa. Maka perlu analisa mendalam terhadap beban yang mengenai pipa akibat tanah timbunan. Pada penyusunan tugas akhir ini, pipa ditanam pada kedalaman 1,5 m, 2 m, dan 4 m. Ada dua jenis tanah yang menimbun pipa dikedalaman tertentu. Jenis tanah tersebut didapat berdasarkan kondisi tanah di *seabed* (jenis tanah dapat dilihat di tabel 4.4). Berikut adalah hasil perhitungan *dawnward resistance*, *imperfection lenght*, dan minimum safety factor disetiap KP *burried pipe*,

**Tabel 4.15.** *Dawnward resistance*

KP (km)	Jenis tanah	dB (m)	L <sub>o</sub>	q (kN/m)	W <sub>o</sub> (kN/m)	SF > 1
0,0 – 1,0	Sand	1,5	8,94	$1,429 \times 10^4$	$8,806 \times 10^3$	1,6
1,0 – 1,5	Clay	2	8,93	$2,057 \times 10^4$	$8,768 \times 10^3$	2,66
1,5 – 2,0	Clay	2	8,91	$2,057 \times 10^4$	$8,703 \times 10^3$	2,68
9,0 – 9,5	Sand	4	8,92	$8,233 \times 10^4$	$8,729 \times 10^3$	9,43
9,5 – 10,0	Sand	4	8,9	$8,233 \times 10^4$	$8,686 \times 10^3$	9,47
10 – 10,5	Sand	4	8,92	$8,233 \times 10^4$	$8,729 \times 10^3$	9,43
10,5 – 11,0	Sand	2	8, 94	$2,338 \times 10^4$	$8,832 \times 10^3$	8,83

Tabel 4.15 menunjukkan bahwa faktor keselamatan akan semakin besar atau semakin baik dengan kedalam timbunan 4 m, tapi dengan konsekuensi beban yang mengenai pipa lebih besar (OTC, 1990). Kedalaman laut yang berbeda-beda juga dapat mempengaruhi beban pada pipa, semakin dalam laut tekanan pada pipa

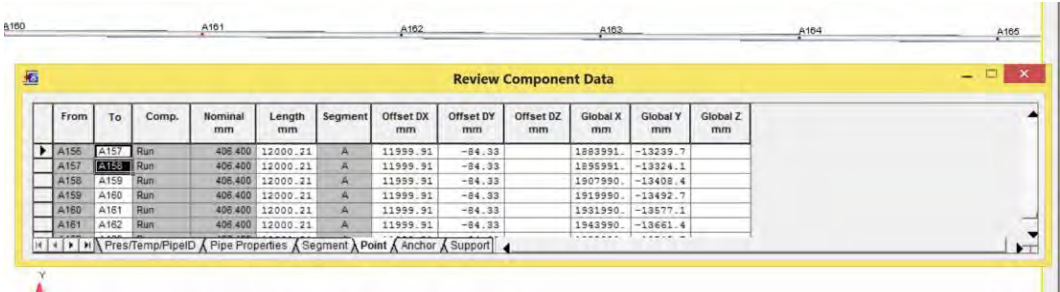
relativ semakin kecil karena selisih antara tekanan eksternal dengan tekanan internal semakin kecil. *Safety* faktor yang paling besar terjadi pada kilometer poin 9,5 – 10,0 sebesar 9,47 dengan kedalaman timbunan pipa sedalam 4 m. Harga *safety* faktor yang paling kecil terjadi pada kilometer poin 0,0 – 1,0 sebesar 1,6 dengan kedalaman timmbunan pipa sedalam 1,5 m.

## 4.7 Pemodelan

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis menggunakan software AutoPIPE untuk memodelkan pipeline dengan panjang total 4 km *burried pipe*. Panjang tersebut terletak di 2 km pesisir batam menuju ketengah laut dan 2 km pesisir tanjung uncang menuju ketengah laut. Dipilihnya daerah pesisir untuk pipa tertimbun karena kondisi kontur yang relativ tidak rata sehingga sudut initial slope menjadi kecil (relativ runcing). Pipeline dimodelkan sepanjang 2 km dengan panjang pipa 12 m.

### 4.7.1 Pesisir Batam

Pipeline di pesisir Batam ditanam dengan kedalaman 1,5 m (tanah jenis *sand*) dan 2m (tanah jenis *clay*). Pipeline dimodelkan dengan kontur yang semakin dalam, kedalaman air yang paling dalam atau batas dari *burried pipe* pesisir batam sedalam 14 m. Berikut adalah hasil pemodelan menggunakan software AutoPIPE,



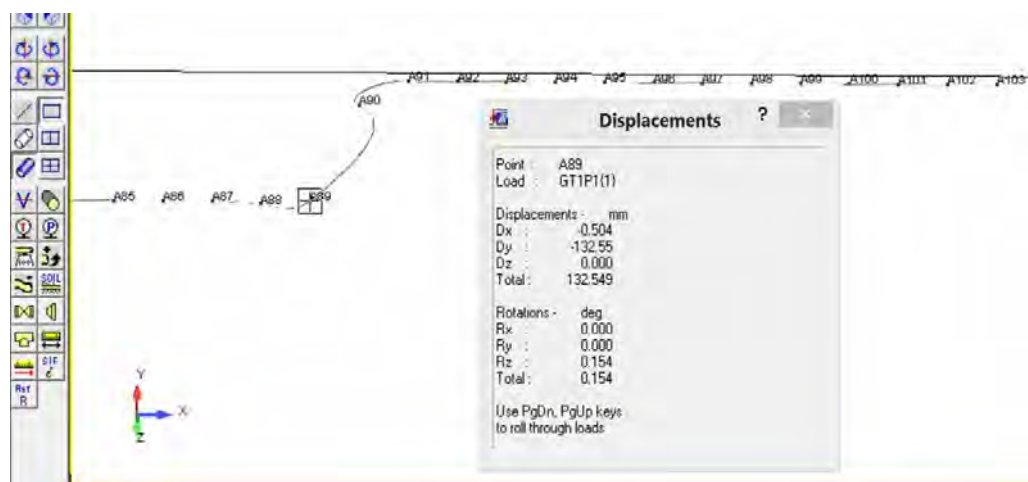
The screenshot displays the AutoPIPE software interface. At the top, a 3D model of a pipeline is shown, with points labeled A150, A151, A152, A153, A154, and A155. Below the model, a 'Review Component Data' window is open, showing a table with the following data:

From	To	Comp.	Nominal mm	Length mm	Segment	Offset DX mm	Offset DY mm	Offset DZ mm	Global X mm	Global Y mm	Global Z mm
A156	A157	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1883991.	-13239.7	
A157	A158	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1895991.	-13324.1	
A158	A159	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1907990.	-13408.4	
A159	A160	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1919990.	-13492.7	
A160	A161	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1931990.	-13577.1	
A161	A162	Run	408.400	12000.21	A	11999.91	-84.33		1943990.	-13661.4	

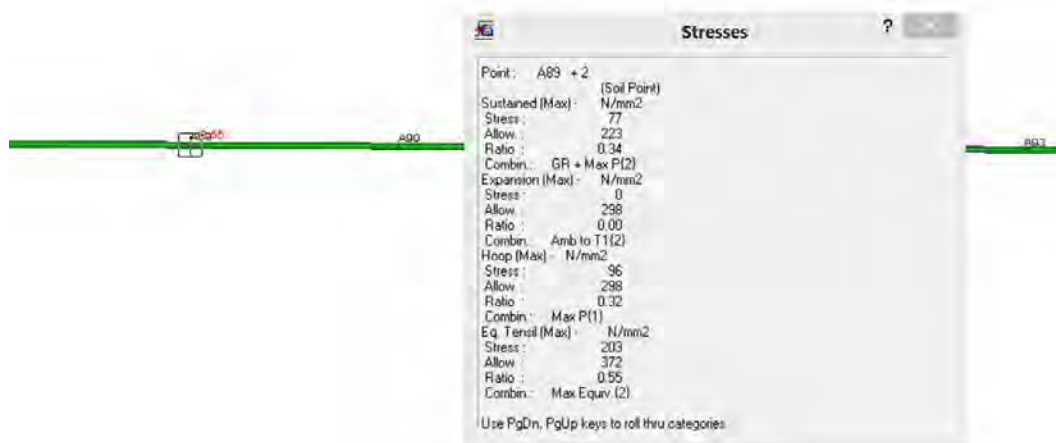
**Gambar 4.3.** Pemodelan pipeline pesisir Batam

Model diatas menunjukkan bahwa pipa semakin menurun yang ditunjukkan oleh offset DY yang bernilai minus. Pipeline pesisir Batam dimodelkan dengan 165 *run pipe*. Informasi mengenai data komponen pipeline dapat dilihat pada lampiran.

Hasil *running* dari pemodelan *pipeline* di pesisir Batam menunjukkan terjadi deformasi paling besar di segmen A89 arah DY sebesar -132,55 mm dan arah DX sebesar -0,504 mm.



**Gambar 4.4.** Deformasi pada segmen A89

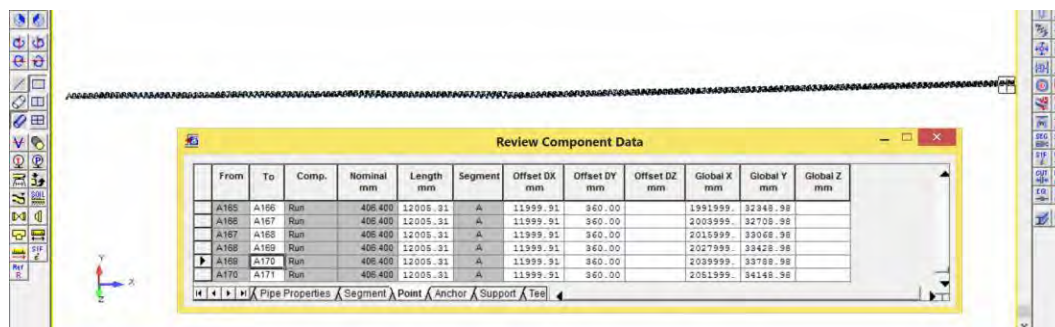


**Gambar 4.5.** Stress pada segmen A89

Gambar diatas menunjukkan, walaupun dengan deformasi sebesar 132,55 mm, stress yang terjadi pada segmen A89 masih dalam batas yang diijinkan karena rasio stress kurang dari 1,0.

#### 4.7.2 Tanjung Uncang

Cara yang sama dilakukan untuk memodelkan *pipeline* yang ada di pesisir Tanjung Uncang. Pipeline di pesisir Tanjung Uncang ditanam dengan kedalaman 4 m dan 2m dengan kondisi jenis tanah seluruhnya sand. Panjang pipeline pesisir Tanjung Uncang sepanjang 2 km dengan kontur yang tidak rata.



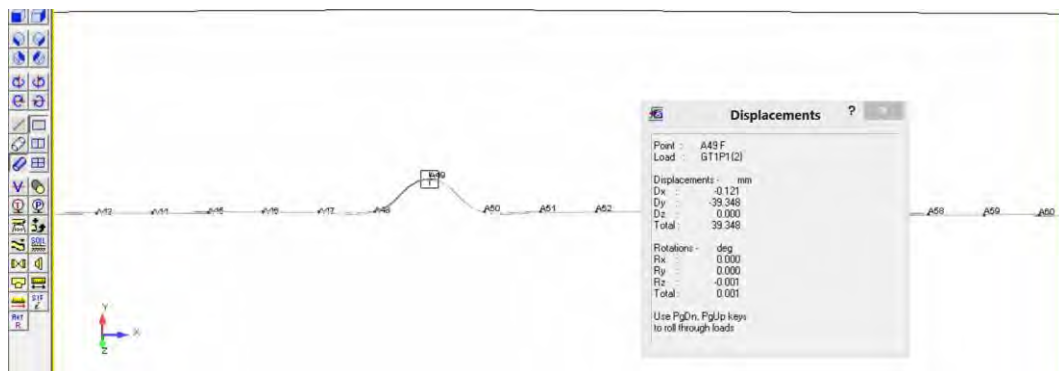
From	To	Comp.	Nominal	Length	Segment	Offset DX	Offset DY	Offset DZ	Global X	Global Y	Global Z
A165	A166	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		1991999.	32349.98	
A166	A167	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		2009999.	32709.98	
A167	A168	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		2019999.	33069.98	
A168	A169	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		2027999.	33429.98	
A169	A170	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		2039999.	33789.98	
A170	A171	Run	406.400	12005.31	A	11999.91	360.00		2051999.	34149.98	

**Gambar 4.6.** Pemodelan *pipeline* di pesisir Tanjung Uncang

Gambar diatas menunjukkan *pipeline* yang cenderung keatas karena pesisir tanjung Uncang dimodelkan dari tengah laut menuju pesisir Tanjung Uncang.

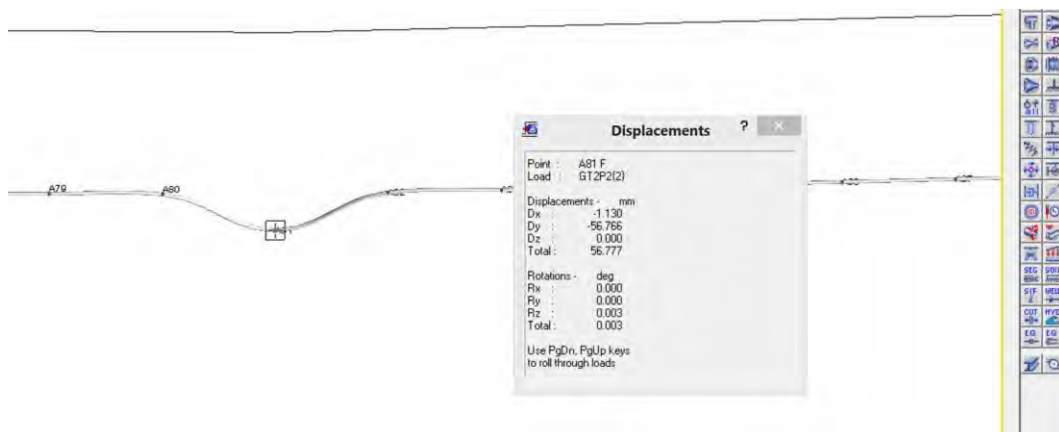
Informasi mengenai data komponen pipeline dapat dilihat pada lampiran.

Hasil *running* dari pemodelan *pipeline* di pesisir Tanjung Uncang menunjukkan terjadi deformasi arah vertikal pada puncak kontur. Deformasi vertikal arah Dy positif terjadi pada segmen A49 sebesar Dx -0,121 mm, Dy -39,348 mm. Segmen A49 dapat dikatakan sebagai upheaval buckling karena nilai deformasi Dy lebih kecil dibandingkan dengan segmen yang lain, maka pipeline pada segmen A49 akan naik atau membentuk puncak seperti pada gambar berikut.

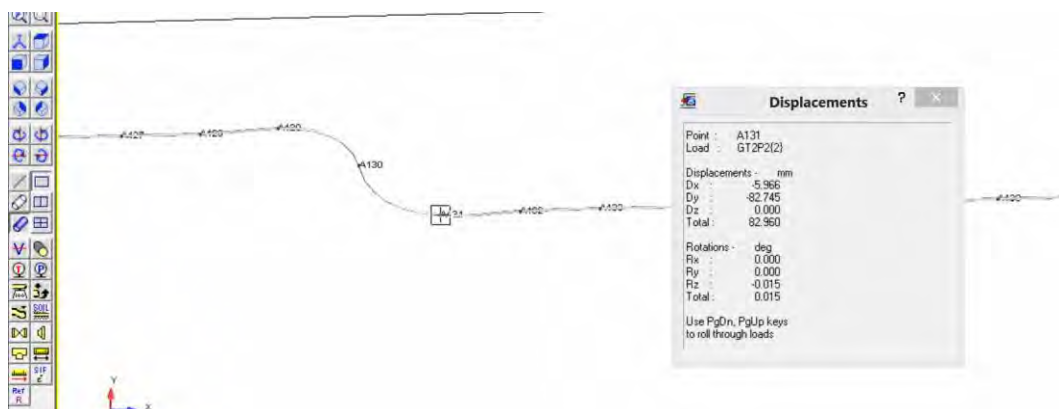


**Gambar 4.7.** Deformasi pada segmen A49

Deformasi juga terjadi pada initial slope yang membentuk lembah. Deformasi pipa akan mengarah kebawah seperti pada segmen A81 sebesar Dx -1,143 mm, Dy -64,447 mm dan pada segmen A131 sebesar Dx -9,364 mm, Dy -82,845 mm.

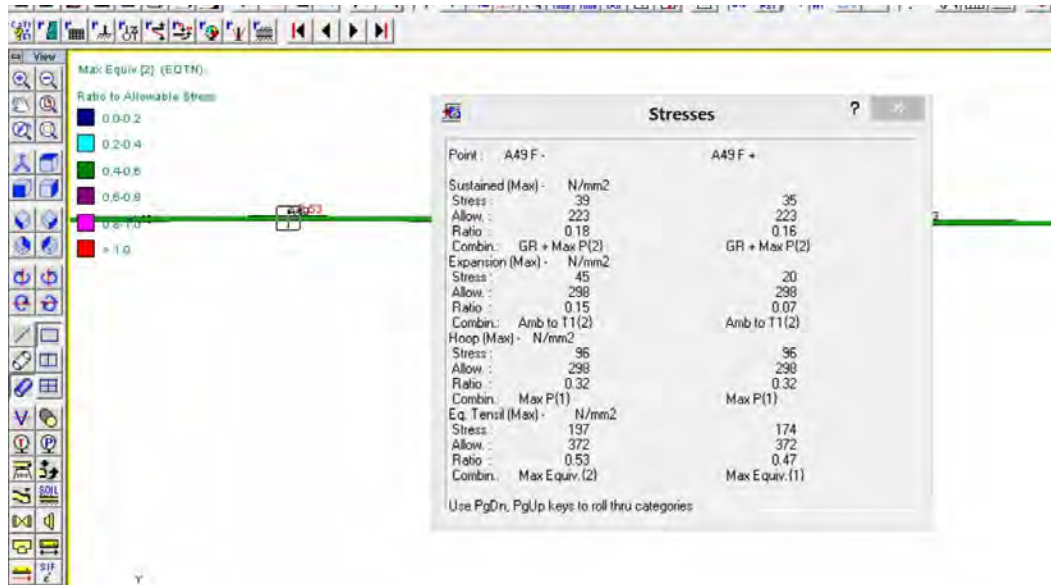


**Gambar 4.8.** Deformasi pada segmen A81 sebesar Dy -64,447 mm



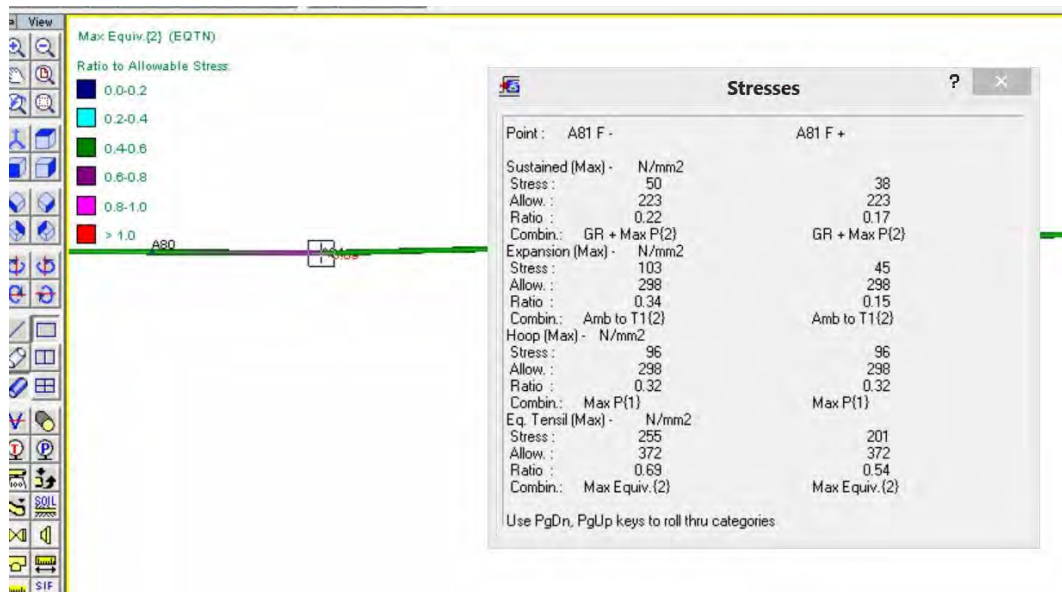
**Gambar 4.9.** Deformasi pada segmen A131 sebesar  $D_y -82,845$  mm

Rasio stress yang terjadi di setiap segmen pipa tidak boleh lebih dari 1,0. Apabila rasio melebihi 1,0 maka pipa dinyatakan mengalami kegagalan walaupun deformasi yang terjadi relatif kecil karena rasio stress menunjukkan perbandingan antara stress yang terjadi dengan stress yang diijinkan.



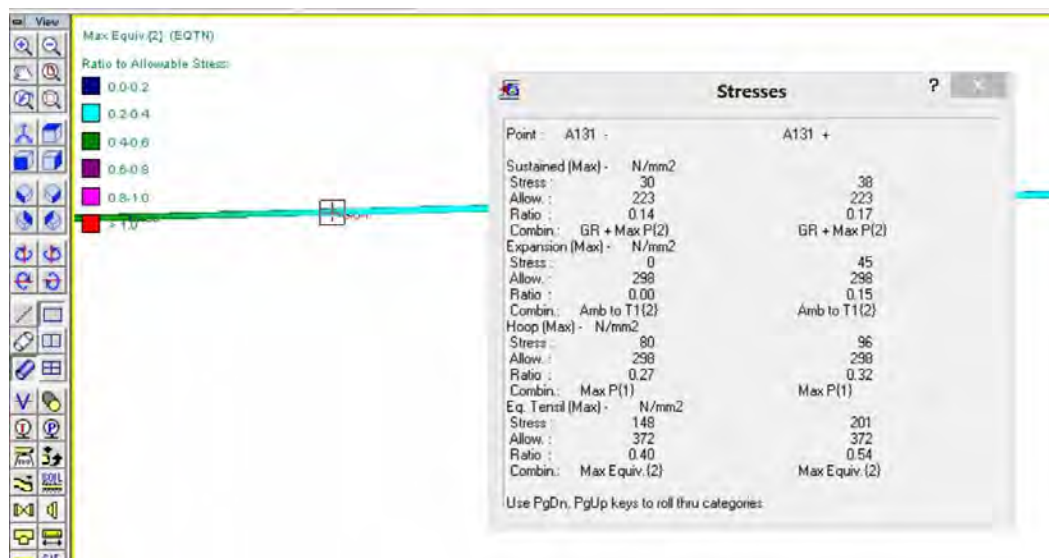
**Gambar 4.10.** stress pada segmen A49

Segmen A49 mengalami *sustained stress* sebesar  $39 \text{ N/mm}^2$  dengan allowable stress sebesar  $223 \text{ N/mm}^2$ . Maka rasio stress pada segmen A49 sebesar 0,18. Pada software AutoPIPE ditunjukkan beberapa stress yang terjadi disetiap segmen yaitu *hoop stress* dan *expantion stress*.



**Gambar 4.11.** Stress pada segmen A81

*Sustained stress* yang terjadi pada segmen A81 sebesar 50 N/mm<sup>2</sup> dengan *allowable stress* sebesar 223 N/mm<sup>2</sup>. Maka rasio stress pada segmen A81 sebesar 0,22.



**Gambar 4.12.** Stress pada segmen A131

Halaman ini sengaja dikosongkan



PIPA = sand

N  $\equiv$  newton

bar  $\equiv 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

s  $\equiv$  sec

C  $\equiv$  K

kN  $\equiv$  N  $\cdot$  1000

kPa  $\equiv$  1000  $\cdot$  Pa

MPa =  $1 \times 10^6$  Pa

g  $\equiv 9.81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

data pipa

Pipa join length  $l_j := 12.2\text{m}$

diameter eksternal  $De := 406.4\text{mm}$

corrosion allowance  $Tc := 1\text{mm}$

toleransi fabrikasi  $t_{fab} := 0.7\text{mm}$

Corrosion Cutback Length  $l_{acc} := 150\text{mm}$

Concrete Coating Cutback Length  $l_{cb} := 250\text{mm}$

modulus young  $E := 2.01799 \cdot 10^5 \text{MPa}$

Steel Density  $\rho_{st} := 7850 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

SMYS := 415MPa

koef termal ekspansi  $\alpha := 1.17 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$

poison ratio  $\nu := 0.3$

submerged unit weight  $\rho_b := 920.489 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Corrosion Coating Density  $\rho_{cc} := 1281.5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Concrete Coating Density  $\rho_{conc} := 3044 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Field Joint Infill Density  $\rho_{infill} := 1025 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Density of Sea Water  $\rho_{water} := 1025 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Installation Temperature  $T_i := 25\text{C}$

load faktor  $L_f := 1.2$

Contents Density  $\rho_{cont} := 14.4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Axial Friction Coefficient  $\mu_{axial} := 0.6$

Trench Angle

$$\Psi_t := 15\text{deg}$$

wall thickness

$$WT := 12.7\text{mm}$$

### Perhitungan tekanan internal dan tekanan eksternal

max pressure operating  $P_{\text{opet}} := 4897000\text{Pa}$

water depth  $W_{\text{depth}} := 3.1\text{m}$

$$P_{\text{int}} := P_{\text{opet}} + \rho_{\text{cont}} \cdot g \cdot W_{\text{depth}}$$

$$P_{\text{eks}} := \rho_{\text{water}} \cdot g \cdot W_{\text{depth}}$$

$$P_{\text{int}} = 4.897 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{eks}} = 3.117 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := P_{\text{int}} - P_{\text{eks}}$$

$$\Delta P = 4.866 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Corrosion Coating Equivalent  
Density

$$\rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} := \frac{(l_j - 2 \cdot l_{\text{acc}}) \cdot \rho_{\text{cc}} + 2 \cdot l_{\text{acc}} \cdot \rho_{\text{infill}}}{l_j}$$

$$\rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} = 1.275 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Concrete Coating Equivalent  
Density

$$\rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} := \frac{(l_j - 2 \cdot l_{\text{cb}}) \cdot \rho_{\text{conc}} + 2 \cdot l_{\text{cb}} \cdot \rho_{\text{infill}}}{l_j}$$

$$\rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} = 2.961 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### Perhitungan diameter terluar pipa

corrosion thickness  $T_{\text{cc}} := 6\text{mm}$

outside diameter with  
corrosion coating  $D_{\text{corcoat}} := D_e + 2 \cdot T_{\text{cc}}$

$$D_{\text{corcoat}} = 0.418 \text{ m}$$

concrete thickness       $T_{\text{conc}} := 55 \text{ mm}$

outside diameter with  
concrete coating       $D_{\text{concoat}} := D_e + 2 \cdot (T_{\text{cc}} + T_{\text{conc}})$

$$D_{\text{concoat}} = 0.528 \text{ m}$$

### Perhitungan massa coating

massa corrosion  
coating       $M_{\text{corcoat}} := \rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{corcoat}}^2 - D_e^2)$

$$M_{\text{corcoat}} = 9.913 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

massa concrete  
coating       $M_{\text{concoat}} := \rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{concoat}}^2 - D_{\text{corcoat}}^2)$

$$M_{\text{concoat}} = 242.224 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

massa coating  
total       $M_{\text{coattotal}} := M_{\text{concoat}} + M_{\text{corcoat}}$

$$M_{\text{coattotal}} = 252.136 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

overall coating density       $\rho_{\text{coattotal}} := \frac{M_{\text{coattotal}}}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{concoat}}^2 - D_e^2)}$

$$\rho_{\text{coattotal}} = 2.815 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tebal coating       $t_{\text{coating}} := T_{\text{conc}} + T_{\text{cc}}$

$$t_{\text{coating}} = 0.061 \text{ m}$$

overall diameter       $D_o := D_e + 2 \cdot t_{\text{coating}}$

	$Do = 0.528 \text{ m}$	
internal diameter	$Di := De - 2 \cdot WT$	$Do = 0.528 \text{ m}$
	$Di = 0.381 \text{ m}$	$j := Do^2$
min wall thickness	$WTc := WT - Tc - t_{fab}$	
	$WTc = 0.011 \text{ m}$	$j = 0.279 \text{ m}^2$
internal diameter dengan min wall thickness	$Di_{fullcor} := De - 2 \cdot WTc$	

perhitungan steel area, massa area, dan gaya buoyancy pipa

$$Tcg := 0\% \cdot Tc$$

$$Tcg = 0$$

$$k := \frac{\pi}{4}$$

Steel Area with General Corrosion

$$A_{steel} := k \cdot [De^2 - (Di + 2 \cdot Tcg)^2]$$

$$A_{steel} = 0.016 \text{ m}^2$$

Steel Mass

$$M_{steel} := A_{steel} \cdot \rho_{st}$$

$$M_{steel} = 123.307 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Coating Area

$$A_{coat} := k \cdot [(De + 2 \cdot t_{coating})^2 - De^2]$$

$$A_{coat} = 0.09 \text{ m}^2$$

Coating Mass

$$M_{coating} := A_{coat} \cdot \rho_{coattotal}$$

$$M_{coating} = 252.136 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Contents Mass with General Corrosion

$$M_{content} := k \cdot (Di + 2 \cdot Tcg)^2 \cdot \rho_{cont}$$

$$M_{content} = 1.642 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

gaya buoyancy  $F_b := k \cdot D_o^2 \cdot \rho_{\text{water}} \cdot g$

$$F_b = 2.205 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$w_s := (M_{\text{steel}} + M_{\text{coating}} + M_{\text{content}}) \cdot g - F_b$$

Submerged Weight  $w_s = 1.494 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$

perhitungan gaya aksial efektif

kombinasi dari tekanan akibat ekspansi termal dan tekanan akibat perbedaan pressure

$$T_p := 20\text{C}$$

Steel Area with Total Corrosion  $A_{\text{stc}} := k \cdot [D_e^2 - (D_i + 2 \cdot T_c)^2]$

gaya ekspansi termal  $F_{\text{tz}} := -E \cdot A_{\text{stc}} \cdot \alpha \cdot T_p$

$$F_{\text{tz}} = -6.851 \times 10^5 \text{ N}$$

Apparent Force  $F_{\text{pz}} := k \cdot (P_{\text{int}} \cdot D_{\text{ifullcor}}^2 - P_{\text{eks}} \cdot D_e^2)$

$$F_{\text{pz}} = 5.643 \times 10^5 \text{ N}$$

gaya hoop  $F_{\text{poisson}} := v \cdot \Delta P \cdot A_{\text{stc}} \cdot \frac{D_e - W T_c}{2 \cdot W T_c}$

$$F_{\text{poisson}} = 3.807 \times 10^5 \text{ N}$$

gaya aksial efektif  $\sigma_{\text{Lz}} := -F_{\text{pz}} + F_{\text{poisson}} + F_{\text{tz}}$

$$\sigma_{\text{Lz}} = -8.687 \times 10^5 \text{ N}$$

$$P_{\text{rd}} := L_f \cdot \sigma_{\text{Lz}}$$

$$P_{\text{rd}} = -1.042 \times 10^6 \text{ N} \quad \text{minus menandakan tegangan yang terjadi mengalami gaya tekan}$$

impeerfection height  $\delta_f := 7.5\text{m}$

imperfection length

$$j := \frac{\pi}{64}$$

$$I := j \cdot (De^4 - Di^4)$$

$$L_o := \left( 72 \cdot E \cdot I \cdot \frac{\delta_f}{w_s} \right)^{0.25}$$

imperfection length  $L_o = 68.656\text{ m}$

length para meter  $L_p$

$$L_p := L_o \cdot \sqrt{\frac{|P_{rd}|}{E \cdot I}}$$

$$L_p = 8.94$$

$$L_p = 8.94$$

$$L_p \geq 8.06$$

Download Parameteer

$$\phi_{w0} := \frac{9.6}{L_p^2} - \frac{343}{L_p^4}$$

$$\phi_{w0} = 0.066$$

download resistance ( $W_o$ )

$$f := 0.5$$

uplift resistance coef for sand soil

$$W_o := \frac{\phi_{w0}}{E \cdot I} \cdot \delta_f \cdot P_{rd}^2$$

burial depth

$$H_b := 1.5\text{m}$$

uplift resistance ( $q_s$ )

$$H_{\text{soilcov}} := H_b - \left( \frac{De}{2} + T_{cc} + T_{\text{conc}} \right)$$

$$H_{\text{soilcov}} = 1.236\text{ m}$$

$$q_s := \rho_b \cdot g \cdot Do \cdot H_{\text{soilcov}} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{H_{\text{soilcov}}}{Do} \right)$$

$$q := q_s + w_s \qquad q_s = 1.279 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$SF := \frac{q}{W_o} \qquad q = 1.429 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \qquad \text{efektif download (q)}$$

$$SF = 1.622$$

$$W_o = 8.806 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$cek := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } SF \geq 1 \\ \text{"No"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$cek = \text{"Ok"}$$





PIPA = sand

N  $\equiv$  newton

bar  $\equiv 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

s  $\equiv$  sec

C  $\equiv$  K

kN  $\equiv$  N  $\cdot$  1000

kPa  $\equiv$  1000  $\cdot$  Pa

MPa  $= 1 \times 10^6$  Pa

g  $\equiv 9.81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

data pipa

Pipa join length  $l_j := 12.2\text{m}$

diameter eksternal  $De := 406.4\text{mm}$

corrosion allowance  $Tc := 1\text{mm}$

toleransi fabrikasi  $t_{fab} := 0.7\text{mm}$

Corrosion Cutback Length  $l_{acc} := 150\text{mm}$

Concrete Coating Cutback Length  $l_{cb} := 250\text{mm}$

modulus young  $E := 2.01799 \cdot 10^5 \text{MPa}$

Steel Density  $\rho_{st} := 7850 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

SMYS  $:= 415 \text{MPa}$

koef termal ekspansi  $\alpha := 1.17 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$

poison ratio  $\nu := 0.3$

submerged unit weight  $\rho_b := 920.489 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Corrosion Coating Density  $\rho_{cc} := 1281.5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Concrete Coating Density  $\rho_{conc} := 3044 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Field Joint Infill Density  $\rho_{infill} := 1025 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Density of Sea Water  $\rho_{water} := 1025 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Installation Temperature  $T_i := 25\text{C}$

load faktor  $L_f := 1.2$

Contents Density  $\rho_{cont} := 14.4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Axial Friction Coefficient  $\mu_{axial} := 0.6$

Trench Angle

$$\Psi_t := 15\text{deg}$$

wall thickness

$$WT := 12.7\text{mm}$$

### Perhitungan tekanan internal dan tekanan eksternal

max pressure operating  $P_{\text{opet}} := 4897000\text{Pa}$

water depth  $W_{\text{depth}} := 20\text{m}$

$$P_{\text{int}} := P_{\text{opet}} + \rho_{\text{cont}} \cdot g \cdot W_{\text{depth}}$$

$$P_{\text{eks}} := \rho_{\text{water}} \cdot g \cdot W_{\text{depth}}$$

$$P_{\text{int}} = 4.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{eks}} = 2.011 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := P_{\text{int}} - P_{\text{eks}}$$

$$\Delta P = 4.699 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Corrosion Coating Equivalent  
Density

$$\rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} := \frac{(l_j - 2 \cdot l_{\text{acc}}) \cdot \rho_{\text{cc}} + 2 \cdot l_{\text{acc}} \cdot \rho_{\text{infill}}}{l_j}$$

$$\rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} = 1.275 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Concrete Coating Equivalent  
Density

$$\rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} := \frac{(l_j - 2 \cdot l_{\text{cb}}) \cdot \rho_{\text{conc}} + 2 \cdot l_{\text{cb}} \cdot \rho_{\text{infill}}}{l_j}$$

$$\rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} = 2.961 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### Perhitungan diameter terluar pipa

corrosion thickness  $T_{\text{cc}} := 6\text{mm}$

outside diameter with  
corrosion coating  $D_{\text{corcoat}} := D_e + 2 \cdot T_{\text{cc}}$

$$D_{\text{corcoat}} = 0.418 \text{ m}$$

$$\text{concrete thickness} \quad T_{\text{conc}} := 55 \text{ mm}$$

$$\text{outside diameter with concrete coating} \quad D_{\text{concoat}} := D_e + 2 \cdot (T_{\text{cc}} + T_{\text{conc}})$$

$$D_{\text{concoat}} = 0.528 \text{ m}$$

### Perhitungan massa coating

$$\text{massa corrosion coating} \quad M_{\text{corcoat}} := \rho_{\text{cc}_{\text{eq}}} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{corcoat}}^2 - D_e^2)$$

$$M_{\text{corcoat}} = 9.913 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{massa concrete coating} \quad M_{\text{concoat}} := \rho_{\text{conc}_{\text{eq}}} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{concoat}}^2 - D_{\text{corcoat}}^2)$$

$$M_{\text{concoat}} = 242.224 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{massa coating total} \quad M_{\text{coattotal}} := M_{\text{concoat}} + M_{\text{corcoat}}$$

$$M_{\text{coattotal}} = 252.136 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{overall coating density} \quad \rho_{\text{coattotal}} := \frac{M_{\text{coattotal}}}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{concoat}}^2 - D_e^2)}$$

$$\rho_{\text{coattotal}} = 2.815 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Tebal coating} \quad t_{\text{coating}} := T_{\text{conc}} + T_{\text{cc}}$$

$$t_{\text{coating}} = 0.061 \text{ m}$$

$$\text{overall diameter} \quad D_o := D_e + 2 \cdot t_{\text{coating}}$$

	$Do = 0.528 \text{ m}$	
internal diameter	$Di := De - 2 \cdot WT$	$Do = 0.528 \text{ m}$
	$Di = 0.381 \text{ m}$	$j := Do^2$
min wall thickness	$WTc := WT - Tc - t_{fab}$	
	$WTc = 0.011 \text{ m}$	$j = 0.279 \text{ m}^2$
internal diameter dengan min wall thickness	$Di_{fullcor} := De - 2 \cdot WTc$	

perhitungan steel area, massa area, dan gaya buoyancy pipa

$$Tcg := 0\% \cdot Tc$$

$$Tcg = 0$$

$$k := \frac{\pi}{4}$$

Steel Area with General Corrosion

$$A_{steel} := k \cdot [De^2 - (Di + 2 \cdot Tcg)^2]$$

$$A_{steel} = 0.016 \text{ m}^2$$

Steel Mass

$$M_{steel} := A_{steel} \cdot \rho_{st}$$

$$M_{steel} = 123.307 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Coating Area

$$A_{coat} := k \cdot [(De + 2 \cdot t_{coating})^2 - De^2]$$

$$A_{coat} = 0.09 \text{ m}^2$$

Coating Mass

$$M_{coating} := A_{coat} \cdot \rho_{coattotal}$$

$$M_{coating} = 252.136 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Contents Mass with General Corrosion

$$M_{content} := k \cdot (Di + 2 \cdot Tcg)^2 \cdot \rho_{cont}$$

$$M_{content} = 1.642 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

gaya buoyancy  $F_b := k \cdot D_o^2 \cdot \rho_{\text{water}} \cdot g$

$$F_b = 2.205 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$w_s := (M_{\text{steel}} + M_{\text{coating}} + M_{\text{content}}) \cdot g - F_b$$

Submerged Weight  $w_s = 1.494 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$

perhitungan gaya aksial efektif

kombinasi dari tekanan akibat ekspansi termal dan tekanan akibat perbedaan pressure

$$T_p := 20\text{K}$$

Steel Area with Total Corrosion  $A_{\text{stc}} := k \cdot [D_e^2 - (D_i + 2 \cdot T_c)^2]$

gaya ekspansi termal  $F_{\text{tz}} := -E \cdot A_{\text{stc}} \cdot \alpha \cdot T_p$

$$F_{\text{tz}} = -6.851 \times 10^5 \text{ N}$$

Apparent Force  $F_{\text{pz}} := k \cdot (P_{\text{int}} \cdot D_{\text{ifullcor}}^2 - P_{\text{eks}} \cdot D_e^2)$

$$F_{\text{pz}} = 5.426 \times 10^5 \text{ N}$$

gaya hoop  $F_{\text{poisson}} := v \cdot \Delta P \cdot A_{\text{stc}} \cdot \frac{D_e - W T_c}{2 \cdot W T_c}$

$$F_{\text{poisson}} = 3.676 \times 10^5 \text{ N}$$

gaya aksial efektif  $\sigma_{\text{Lz}} := -F_{\text{pz}} + F_{\text{poisson}} + F_{\text{tz}}$

$$\sigma_{\text{Lz}} = -8.601 \times 10^5 \text{ N}$$

$$P_{\text{rd}} := L_f \cdot \sigma_{\text{Lz}}$$

$$P_{\text{rd}} = -1.032 \times 10^6 \text{ N} \quad \text{minus menandakan tegangan yang terjadi mengalami gaya tekan}$$

imperfection heighth  $\delta_f := 7.5\text{m}$

imperfection length

$$j := \frac{\pi}{64}$$

$$I := j \cdot (D_e^4 - D_i^4)$$

$$L_o := \left( 72 \cdot E \cdot I \cdot \frac{\delta_f}{w_s} \right)^{0.25}$$

imperfection length  $L_o = 68.656\text{ m}$

length para meter  $L_p$

$$L_p := L_o \cdot \sqrt{\frac{|P_{rd}|}{E \cdot I}}$$

$$L_p = 8.896$$

$$L_p = 8.896$$

$$L_p \geq 8.06$$

Download Parameteer

$$\phi_{w0} := \frac{9.6}{L_p^2} - \frac{343}{L_p^4}$$

$$\phi_{w0} = 0.067$$

download resistance ( $W_o$ )

$$f := 0.5$$

uplift resistance coef for sand soil

$$W_o := \frac{\phi_{w0}}{E \cdot I} \cdot \delta_f \cdot P_{rd}^2$$

burial depth  $H_b := 4\text{m}$

uplift resistance ( $q_s$ )

$$H_{\text{soilcov}} := H_b - \left( \frac{D_e}{2} + T_{cc} + T_{\text{conc}} \right)$$

$$H_{\text{soilcov}} = 3.736\text{ m}$$

$$q_s := \rho_b \cdot g \cdot D_o \cdot H_{\text{soilcov}} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{H_{\text{soilcov}}}{D_o} \right)$$

$$q := q_s + w_s \qquad q_s = 8.084 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$SF := \frac{q}{W_o} \qquad q = 8.233 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \qquad \text{efektif download (q)}$$

$$SF = 9.522$$

$$W_o = 8.647 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$cek := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } SF \geq 1 \\ \text{"No"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$cek = \text{"Ok"}$$





**OBJECTIVE:**

The objective of this spreadsheet is to determine soil stiffness in accordance with AutoPIPE Software Manual for input Value of AutoPipe soil model.

**INTRODUCTION**

This spreadsheet calculates the following:

- soil resistance to lateral movement
- soil resistance to longitudinal movement
- soil resistance to vertical movement

**REFERENCES**

1. Autopipe V8i Help Desk
2. PLNB-UBE/PLO-HDK-30.2-001 Pipeline Design Basis
3. 464-UBE-PR-BATAM Rev.4 Geophysical and Geotechnical Pipeline Route Survey from Pemping to Batam Island

**UNITS:**

N  $\equiv$  newton    bar  $\equiv 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$     s  $\equiv$  sec    g  $\equiv 9.81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$     kPa  $\equiv 1000 \cdot \text{Pa}$     kN  $\equiv 1000 \cdot \text{N}$

**INPUT DATA****Pipeline Properties:**

External Diameter	De := 16in	
Wall Thickness	WT := 12.7·mm	
Corrosion Coating Thickness	Tc := 4·mm	
Concrete Coating Thickness	Tcc := 55mm	harga $\delta$ berdasarkan API-R P2A untuk jenis tanah silty sand dengan sudut internal friction 30 degree

**Soil Properties:**

Soil type	sand	
Depth of Ground Surface to Top of Pipe	db := 4m	
Undrianed Shear Strength of Soil	Su := 30kPa	$\frac{S_u}{g} = 626.3 \cdot \frac{1b}{ft^2}$
Angke of Internal Friction for clay	$\phi := 30.00 \cdot \text{deg}$	ks := 0.8
Effective Unit Weight (wet)	$\gamma_{H2O} := 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\delta_x := 25.00 \text{ deg}$
Effective Unit Weight (Saturated)	$\gamma_{\text{sat}} := 1529.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$x := \tan(\delta_x)$

**PRELIMINARY CALCULATIONS**

Total Outside Diameter	D := De + 2 · (Tc + Tcc)	D = 524.4·mm	
Depth of Ground Surface to Bottom of Pipe	H(d) := d + D	D = 0.5m	
		H(4m) = 4.5m	Rs := 6.3
Depth of Ground Surface to Center of Pipe	z(d) := d + $\frac{D}{2}$	z(4m) = 4.3m	z0 := 4.3m
			h0 := 4.5m
Nondimensionless Parameter (H/D)	$\frac{H(d_b)}{D} = 8.6$	nyari Rc	H(d <sub>b</sub> ) = 4.52m

Nondimensionless Parameter (db/D)

$$\frac{d_b}{D} = 7.6$$

nyari koef daya dukung

Bearing Capacity factor

$$N_c := 30.14$$

$$N_g := 15.67$$

$$N_q := 18.40$$

Adhesion Factor [Figure D-10 (API) - Ref.1]

$$ad := 0.82$$

for

$$S_u = 0.627 \cdot \frac{\text{kip}}{\text{ft}^2}$$

Breakout Factor Figure D-14, [Ref.1]

$$F_c := 8.1$$

for

Clay

$$F_q := 2.7$$

for

Sand

Soil Stiffness Table D-6  
, [Ref.1]

$$k_i := 201 \text{ lb} \cdot \text{in}^{-3}$$

for

$$\frac{S_u}{g} = 626.349 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$

Transverse Resistance Coeff. Table  
D-7, [Ref.1]

$$R_c := 5.5$$

for

Clay

Equivalent effective unit weight  
(assumed that top of pipe is  
below water table), [Ref.1]

$$\gamma_e := \gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 529.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\gamma_e = 33.03 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Effective unit weight of  
soil weigh per untt length

$$w_s := \gamma_e \cdot \left[ D \cdot d_b + 0.5 \cdot D^2 \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

$$w_s = 1125.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$$
$$w_s = 756.3 \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}^{-1}$$

#### **SOIL STIFNESS CALCULATION**

##### **Transverse Horizontal**

Ultimate soil resistance to  
transverse pipe displ.

$$p_{th} := R_s \cdot D \cdot z_0 \cdot \gamma_e$$

$$p_{th} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{s^2} = 7516.4 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Initial slope of the transv.  
resistance-displ. curve

$$k_{th}(d) := z_0 \cdot k_i$$

$$k_{th}(d_b) \cdot g = 23.35 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

##### **Longitudinal**

Ultimate soil resistance to  
longitudinal pipe displ.

$$p_l := \pi \cdot D \cdot k_s \cdot z_0 \cdot \gamma_e \cdot x$$

$$p_l \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{s^2} = 1398.2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Initial slope of the longttudinal  
resistance-displ.curve

$$k_l := \frac{45 \cdot p_l}{D}$$

$$k_l \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{s^2} = 0.12 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

##### **Transverse Vertical Up**

Ultimate soil resistance to  
upward pipe displ.

$$p_{tvu} := w_s + D \cdot d_b \cdot \gamma_e \cdot F_q$$

$$p_{tvu} \cdot g = 40437 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Initial slope of the longttudinal  
resistance-displ.curve

$$k_{tv} := \begin{cases} \frac{75 \cdot p_{tvu}}{d_b} & \text{if } d_b > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{tv} \cdot g = 0.76 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

##### **Transverse Vertical Down**

Ultimate soil resistance to  
downward pipe displ.

$$p_{tvd} := D \cdot \gamma_e \cdot (0.5 \cdot D \cdot N_g + h_0 \cdot N_q)$$

$$p_{tvd} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{s^2} = 24113.7 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Transverse Vertical Down

$$k_{tvd} := 8 \cdot \frac{p_{tvd}}{D}$$

$$k_{tvd} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{s^2} = 0.37 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Table D-8 Transverse Resistance Coefficient $R_t$ for Pipes in Sand $R_t$ at Various Relative Densities			
H/d	Loose	Medium-Dense	Dense
1	2.7	3.9	5.7
2	3.0	4.5	6.9
3	3.8	5.9	9.6
4	4.5	7.2	11.9
5	5.0	8.2	13.7
6	5.4	8.9	15.2
8	6.0	10.0	17.2
10	6.4	10.7	18.6
12	6.6	11.3	19.6
H = depth from ground surface to bottom of pipe			
d = pipe diameter			

Table D-10 f and $\delta$ for Medium/Dense to Dense Granular Soil (after API-RP2A)		
Soil Type	$\phi$	$\delta$
Clean sand	35°	30°
Silty sand	30°	25°
Sandy silt	25°	20°
Silt	20°	15°
$\phi$ = angle of internal friction		
$\delta$ = angle of friction between soil & steel		

**OBJECTIVE :**

The objective of this spreadsheet is to determine soil stiffness in accordance with AutoPIPE Software Manual for input Value of AutoPipe soil model.

## INTRODUCTION

This spreadsheet calculates the following:

- soil resistance to lateral movement
- soil resistance to longitudinal movement
- soil resistance to vertical movement

## REFERENCES

1. Autopipe V8i Help Desk
2. PLNB-UBE/PLO-HDK-30.2-001 Pipeline Design Basis
3. 464-UBE-PR-BATAM Rev.4 Geophysical and Geotechnical Pipeline Route Survey from Pemping to Batam Island

**UNITS:**

N  $\equiv$  newton      bar  $\equiv 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$       s  $\equiv$  sec      g  $\equiv 9.81 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$       kPa  $\equiv 1000 \cdot \text{Pa}$       kN  $\equiv 1000 \cdot \text{N}$

### INPUT DATA

### Pipeline Properties:

External Diameter	De := 16 in
Wall Thickness	WT := 12.7 mm
Corrosion Coating Thickness	Tc := 4 mm
Concrete Coating Thickness	T <sub>CC</sub> := 55 mm

### Soil Properties:

Soil Properties:		
Soil type	Clay	
Depth of Ground Surface to Top of Pipe	$d_b := 1.5\text{m}$	
Undrained Shear Strength of Soil	$S_u := 30\text{kPa}$	$\frac{S_u}{g} = 626.3 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$
Angle of Internal Friction for clay	$\phi := 10.00 \cdot \text{deg}$	
Effective Unit Weight (wet)	$\gamma_{H2O} := 1000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
Effective Unit Weight (Saturated)	$\gamma_{\text{sat}} := 1529.1\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	

## PRELIMINARY CALCULATIONS

Total Outside Diameter	$D := D_e + 2 \cdot (T_c + T_{Cc})$	$D = 524.4 \cdot \text{mm}$
Depth of Ground Surface to Bottom of Pipe	$H(d) := d + D$	$D = 0.5 \text{ m}$
		$H(1.5 \text{ m}) = 2 \text{ m}$
Depth of Ground Surface to Center of Pipe	$z(d) := d + \frac{D}{2}$	$z(1.5 \text{ m}) = 1.8 \text{ m}$
Nondimensionless Parameter(H/D)	$\frac{H(d_b)}{D} = 3.9$	nyari Rc $H(d_b) = 2.02 \text{ m}$

Nondimensionless Parameter (db/D)	$\frac{d_b}{D} = 2.9$	nyari koef daya dukung	
Bearing Capacity factor	$N_c := 8.35$		$N_q := 2.47$
Adhesion Factor [Figure D-10 (API) - Ref.1]	$ad := 0.82$	for	$S_u = 0.627 \cdot \frac{\text{kip}}{\text{ft}^2}$
Breakout Factor Figure D-14, [Ref.1]	$F_c := 5.9$	for	Clay
	$F_q := 1.4$	for	Sand
Soil Stiffness Table D-5, [Ref.1]	$k_1 := 128.27 \text{ lb} \cdot \text{in}^{-3}$	for	$\frac{S_u}{g} = 626.349 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$
Transverse Resistance Coeff. Table D-7, [Ref.1]	$R_c := 5.5$	for	Clay
Equivalent effective unit weight (assumed that top of pipe is below water table), [Ref.1]	$\gamma_e := \gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{H2O}} = 529.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$		$\gamma_e = 33.03 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$
Effective unit weight of soil weigh per untt length	$w_s := \gamma_e \cdot \left[ D \cdot d_b + 0.5 \cdot D^2 \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]$		$w_s = 431.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ $w_s = 290.2 \cdot \text{lb} \cdot \text{ft}^{-1}$

#### **SOIL STIFNESS CALCULATION**

##### **Transverse Horizontal**

Ultimate soil resistance to transverse pipe displ.	$p_{th} := D \cdot R_c \cdot S_u$	$p_{th} = 86526 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Initial slope of the transv. resistance-displ. curve	$k_{th}(d) := z(d) \cdot k_1$	$k_{th}(d_b) \cdot g = 61.38 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

##### **Longitudinal**

Ultimate soil resistance to longitudinal pipe displ.	$p_1 := \pi \cdot D \cdot ad \cdot S_u$	$p_1 = 40527.3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Initial slope of the longttudinal resistance-displ.curve	$k_1 := \frac{45 \cdot p_1}{D}$	$k_1 = 3.48 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

##### **Transverse Vertical Up**

Ultimate soil resistance to upward pipe displ.	$p_{tvu} := w_s + D \cdot \left( F_c \cdot \frac{S_u}{g} + d_b \cdot \gamma_e \cdot F_q \right)$	$p_{tvu} \cdot g = 102770.7 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Initial slope of the longttudinal resistance-displ.curve	$k_{tv} := \begin{cases} \frac{75 \cdot p_{tvu}}{d_b} & \text{if } d_b > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	$k_{tv} \cdot g = 5.14 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

##### **Transverse Vertical Down**

Ultimate soil resistance to downward pipe displ.	$p_{tvd} := D \cdot \left( \frac{1}{2} D \cdot \gamma_e \cdot N_q \cdot g + S_u \cdot N_c \right)$	$p_{tvd} = 133125 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Transverse Vertical Down	$k_{tvd} := 8 \cdot \frac{p_{tvd}}{D}$	$k_{tvd} = 2.03 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$

Table D-5 Values of $k$ for Clays	
Undrained Shear Strength $S_u$ (lb/ft <sup>2</sup> )	Range of $k$ Values (lb/in <sup>3</sup> )
250	10 - 30
500	30 - 100
1000	100 - 300
2000	300 - 1000
4000	1000 - 3000

Table D-7 Transverse Resistance Coefficient $R_c$ for Pipes in Clay	
H/d	$R_c$
1	2.0
2	3.5
3	4.5
4	5.3
5	6.0
6	6.7
8	8.0
10	8.2
$\geq 12$	9.0
H = depth from ground surface to bottom of pipe	
d = pipe diameter	

## **DAFTAR LAMPIRAN**

**LAMPIRAN A** Gaya Aksial Efektif

**LAMPIRAN B** Gaya Tekan Tanah

**LAMPIRAN C** Outpout AutoPIPE Tanjung Uncang

**LAMPIRAN D** Output AutoPIPE Pesisir Batam

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus dan analisis, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut,

1. Upheaval buckling terjadi karena adanya gaya aksial efektif akibat pengaruh perbedaan tekanan, dan perbedaan temperatur. Perbedaan tekanan antara tekanan eksternal dengan tekanan internal dapat menyebabkan gaya Poisson yang cukup besar. Sedangkan perbedaan temperatur saat instalasi dengan saat operasi dapat menyebabkan gaya ekspansi yang besar. Kedalaman timbunan akan menyebabkan *uplift resistance* yang akan menahan gaya aksial efektif. Semakin dalam timbunan maka akan semakin besar pula gaya *uplift resistance* pada pipa. Gaya aksial yang paling besar terjadi pada kedalaman 0,22 m sebesar  $-1,044 \times 10^6$  N dan gaya aksial yang paling kecil terjadi di kedalaman 20 m sebesar  $-1,032 \times 10^6$  N. Sedangkan *Safety* faktor yang paling besar terjadi pada kilometer poin 9,5 – 10,0 sebesar 9,47 dengan kedalaman timbunan pipa sedalam 4 m. Harga *safety* faktor yang paling kecil terjadi pada kilometer poin 0,0 – 1,0 sebesar 1,6 dengan kedalaman timmbunan pipa sedalam 1,5 m.
2. Perbedaan *submerged soil density* antara *sand* dan *clay* menyebabkan perbedaan berat tanah per satuan meter. Berat yang berbeda dari setiap jenis tanah akan mempengaruhi uplift resistance. Tanah jenis clay mempunyai uplift resistance yang lebih besar dibanding dengan tanah jenis sand. Hal itu disebabkan karena sifat kohesi tanah berlempung tinggi, sedangkan tanah berpasir tidak mempunyai kohesi yang besar atau tidak bisa saling mengikat antar partikel.
3. Upheaval Buckling dapat terjadi karena tahanan tanah yang tidak bisa menahan gaya aksial efektif. Untuk mengatasi *upheaval* dapat dilakukan



pemasangan anchor pada *initial slope* yang ekstrim, atau menambahkan timbunan tanah pada daerah yang kritis.

## **5.2   Saran**

Bagi mahasiswa yang berminat mengambil tugas akhir yang berkaitan dengan upheaval buckling, penulis menyarankan pemodelan pipeline secara menyeluruh, tidak hanya memodelkan pipa yang tertimbun saja. Beban occasional atau beban gempa disarankan diperhitungkan untuk tugas akhir selanjutnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- API RP 2A 2007 “*Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*”. Washington.
- ASME B31. 4. 2006. “*Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*”. New York.
- ASME B31. 8. 2007. “*Gas Transmission and Distribution Piping System*”. New York.
- DNV RP-F-110. 2007. “*Global Buckling of Submarine Pipelines*”. Norway.
- Fan, Shengsheng. 2013. “*Upheaval Buckling of Buried Pipeline*”. Master Thesis. Department of Marine Technology. NTNU. Norway.
- Karamanos, Spyros. 2009. “*Structural Integrity Of Steel Oil & Gas Pipelines With Local Wall Distortions*”. [http://www.mie.uth.gr/labs/mex-lab/Structural\\_integrity1-5.html](http://www.mie.uth.gr/labs/mex-lab/Structural_integrity1-5.html).
- Lim, Aswin. 2013. “Kajian Daya Dukung Pondasi Menerus Terhadap Jarak Antar Pondasi dan Kondisi Tanah yang Berlapis”. Universitas Katolik Parahyangan.
- Meyerhof, G.G. 1963. “*Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundation*”. Canadian Geotechnical Journal.
- Norris, Toby. 2009. “*Algorithm Derivation: Single Cylinder Solution*”. [http://www.tobynorris.com/work/prog/cpp/mfc/concyl\\_hlp/algorithmderivation.htm](http://www.tobynorris.com/work/prog/cpp/mfc/concyl_hlp/algorithmderivation.htm).
- OTC. 1990. “*Design of Submarine Pipelines Againsts upheaval Buckling*”. OTC Program Committee. Texas. 1990.
- Palmer, A. C. Dan Baldry, J.A.S. 1974. “*Lateral Buckling of Axially-Compressed Pipelines*”. Journal Petroleum of Technology. 1974.
- Prayoga, Friga Surya. 2012. “Studi Pengaruh Temperatur, Tekanan Internal, dan Kedalaman Tanah Terhadap Mekanisme *Upheaval Buckling* pada Pipa *Onshore*”. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan. ITS. Surabaya.

- Rahman, Fahmi Fazlur. 2012. “Analisa Penyebab Terjadinya *Upheaval Buckling* pada *pipeline* 16” dan *Corrective action*”. Tugas Akhir. Jurusan teknik Kelautan. ITS. Surabaya
- Rieska. 2013. “*Upheaval Buckling of Offshore Pipelines*”.  
<http://nonerieska.wordpress.com/2013/02/01/upheaval-buckling-of-offshore-pipelines/>
- Rizaldi, Armando. 2008. “Analisa Buckling Pada Saat Instalasi Pipa Bawah Laut: Studi Kasus Saluran Pipa Baru “Karmila - Titi” Milik CNOOC Di Offshore South East Sumatra”. Tugas akhir. Jurusan teknik kelautan. ITS. Surabaya.
- Robydiansyah. 2010. “Kajian Ulang Stabilitas Geser dan Guling *Parafet* di Sungai Grindulu Kabupate Pacitan”. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Negri Yogyakarta.
- Yunnita, Cut. 2008. “Studi Parameter Pipa Dalam Tanah Terlikuifaksi”. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Indonesia.

## BIODATA PENULIS



Novrizal Putra Aulia dilahirkan di Denpasar, 16 November 1992. Pendidikan dari SD sampai SMP ditempuhnya di Denpasar, Bali dan lulus tahun 2007. Penulis kemudian melanjutkan ke salah satu sekolah di kota Malang. Lulus dari MAN 3 Malang pada tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, salah satu jurusan dibidang kelautan terbaik di Indonesia. Selama kuliah, penulis aktif dalam berbagai organisasi serta kegiatan sebagai panitia maupun peserta. Berbagai pelatihan dan seminar pernah diikutinya dalam rangka untuk pengembangan diri. Penulis pernah menjabat sebagai staff di biro Media Informasi Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan. Selain itu penulis juga merupakan salah satu asisten Laboratorium Dinamika Struktur – Jurusan Teknik Kelautan sampai tahun 2014. Pada bulan Februari 2014, penulis mengambil Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan pendidikan Strata 1, dengan judul “Analisa Mekanisme Upheaval Buckling Pada Offshore Pipelines Setudi Kasus: PT. Universal Batam Energy (PT. UBE) Dengan Variabel Tanah, Temperatur, Dan Tekanan” dan berhasil diselesaikannya dalam 1 semester.